



**HAL**  
open science

# Création d'objets mats : optimisation d'un procédé d'impression en relief en termes d'apparence

Marine Page

► **To cite this version:**

Marine Page. Création d'objets mats : optimisation d'un procédé d'impression en relief en termes d'apparence. Art et histoire de l'art. Conservatoire national des arts et métiers - CNAM, 2018. Français. NNT : 2018CNAM1204 . tel-01986508

**HAL Id: tel-01986508**

**<https://theses.hal.science/tel-01986508v1>**

Submitted on 18 Jan 2019

**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.

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES METIERS DE L'INGENIEUR

Laboratoire commun de Métrologie LNE-Cnam

# THÈSE DE DOCTORAT

présentée par : **Mlle Marine PAGE**

soutenue le : **19 décembre 2018**

pour obtenir le grade de : **Docteur du Conservatoire National des Arts et Métiers**

Discipline/ Spécialité : **Milieux dilués et Optique / Lasers, Nanosciences et Métrologie**

## CREATION D'OBJETS MATS

Optimisation d'un procédé d'impression en relief en  
termes d'apparence

### THÈSE dirigée par :

Madame Annick RAZET

Professeur des Universités, Cnam

### RAPPORTEURS :

Madame Anne BLAYO

Monsieur Lionel SIMONOT

Enseignant-chercheur, INP Pagora

Maître de conférence, Université de Poitiers

### JURY :

Monsieur Marc HIMBERT

Madame Christine ANDRAUD

Professeur, Cnam

Professeur, Museum d'histoire naturelle –  
Présidente du jury

Monsieur Frédéric DU BURCK

Madame Clotilde BOUST

Madame Maria ORTIZ SEGOVIA

Professeur, Université Paris 13

Maître de conférence, C2RMF

Ingénieur - docteur, Océ PLT

### INVITÉS :

Monsieur François BRIDEY

Monsieur Gaël OBEIN

Conservateur du patrimoine, Louvre

Maître de conférence, Cnam



*L'ensemble de ce travail est dédié à la mémoire de*

*Jean Marc Page  
(1955 – 2018)*

*Délégué académique aux Enseignements techniques au Rectorat d'Amiens,  
Officier dans l'ordre des Palmes académiques,  
Médaille d'argent du tourisme,  
mon père.*



# Remerciements

Mes premières pensées vont à Madame Annick Razet, professeur des Universités, qui a accepté de diriger mes travaux et avec laquelle j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler et discuter. Merci à Monsieur Marc Himbert, directeur du LNE-Cnam, mon laboratoire de rattachement, pour son soutien et ses conseils. Un grand merci à Gaël Obein, mon encadrant du côté LNE-Cnam, pour nos heures de travail ensemble et ses encouragements.

Je remercie également Madame Isabelle Pallot-Frossard, directrice du Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, et Monsieur Michel Menu, chef du département Recherche, d'avoir rendu possible ma thèse au C2RMF. Merci à Clotilde Boust, chef du groupe Imagerie, de m'avoir prise en stage il y a plusieurs années, d'avoir cru en moi et de m'avoir gardée en thèse ; merci pour son soutien tout au long de ces trois années.

Je remercie à Océ Print Logic Technologies Monsieur Christophe Leynadier et Madame Maria Ortiz Segovia, qui ont rendu ce projet possible. Mes pensées vont surtout à Hervé Suquet, responsable du département R&D, et Pierre-Yves Le Gall, directeur de site, qui m'ont écoutée et soutenue. Merci mille fois pour votre gentillesse et votre confiance.

Je remercie les membres du jury qui ont accepté de relire et d'évaluer ce travail, en particulier les rapporteurs Monsieur Lionel Simonot et Madame Anne Blayo. Un grand merci à Madame Christine Andraud qui m'accompagne depuis plusieurs années, du Museum en 2013 à cette soutenance. Merci également à Monsieur Frédérick Du Burck, professeur au Laboratoire de Physique des Lasers de l'Université Paris 13, et à Monsieur François Bridey, conservateur au département des Antiquités Orientales au Musée du Louvre, et d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

Travailler sur trois sites m'a causé beaucoup de complications au quotidien, mais m'a aussi donné la chance de croiser beaucoup de collègues formidables. Tout d'abord merci à tous mes collègues et amis du Cnam, qui ont fait de mes journées de travail auprès d'eux de vraies bouffées d'air : Pascal Gambette (il faut toujours qu'on aille dessiner au Louvre !), Lara Risegari, Catherine Martin, Zaccaria Silvestri, l'équipe déchaînée du gonio Guillaume Ged et Ana Rabal, Arnaud Richard, Thomas Lavergne, Hugo Frederich, Mark Plimmer, Daniel Truong, Joffrey Guillory, Stéphane Aubert qui m'a accueillie dans son bureau, Joseph... Mille mercis en particulier au Professeur Patrick Juncar : quel plaisir d'avoir pu travailler à vos côtés ! Je pense aussi à Irena, rencontrée à un cours de probabilités, qui est devenue une très bonne amie.

A Océ, je voudrais dire merci à Théo, Catherine, Felicia, Jean-Marie, Cédric, Ricardo et Arlette, pour avoir été présents et disponibles, et d'une gentillesse sans faille. Un grand merci à Henk Draaisma sur service de la Propriété Intellectuelle avec qui j'ai beaucoup travaillé. Je pense

également à Willy Babin, Catherine Mucel, Audrey Fontanel, Pascal Koffi, Christian Cavalier, Marine Lauga, Marine Lefevre et Agnès Emmanuel, merci pour leur gentillesse au quotidien. Riadh, Jérôme, Yannick et Luc m'ont bien manqué, dommage qu'ils aient quitté Océ. Je pense aussi à Annie et Philippine, qui sont devenues mes amies, et à tous les collègues que je croisais peu mais qui ont fait d'Océ un endroit sympathique malgré tout : Aurélien, Mathieu, Patrick, Mehdi, Jean-Louis, Michel... Vlad, merci mille fois pour toutes nos discussions scientifiques et amicales, tu m'as vraiment aidée.

Que de gens au C2 ont fait de mon passage une expérience incroyable ! Le groupe imagerie en tout premier lieu : Jean-Louis, Anne, Laurence, Elsa, Gérald, Philippe et Alexis, Nicolas, Charlotte, merci pour tout...pour votre gentillesse, votre soutien sans faille depuis mon stage en 2015. En particulier, merci à Anne de m'avoir autant aidée en photo, sur le sparkle et les objets d'applications. Jean-Louis, je te dois quelques macarons d'Amiens ! Merci à Dominique Robcis pour ses conseils, les opportunités dont il m'a fait profiter, toutes nos conversations sur des objets à Aglae, et ses relectures. Merci à Thomas Calligaro pour toutes nos discussions 3D, ACP, microtopographie, et avenir en général. Abdelkader, merci pour ta bonne humeur et ton aide sur nos PC ! Merci à Elizabeth, Yvan, Eric, Christelle, Laurent, Brice, Rémi, Eva, et à tous mes amis stagiaires, apprentis, thésards ou post-doctorants : Marion, Lucile <3, Anaïs, Corinna, Hitomi, Maxime, Gianluca, Jérôme, Gautier, Kilian, Victor, Xueshi, Anne W, Nicolas, Fiona... Anaïs, merci mille fois pour tout le soutien dont tu m'as entourée ces derniers temps. Corinna, je n'ai pas été très assidue en italien ! Mais c'était super de discuter avec toi. Marion, merci pour ton amitié ces trois dernières années : les expos (même si je cours et que tu traînes), Dire Straits, Clint Eastwood, Alexandre Dumas...il va falloir des weekends de rattrapage ! Gianluca, nous avons partagé notre désespoir, merci, honoré directeur ! Je remercie tout particulièrement Gilles Bastian, pour son aide au cours de mon travail et son soutien, et Quentin Lemasson pour son amitié constante depuis 2015. Je pense aussi aux collègues de Flore : Manuel Leroux, Sylvie Watelet (mille mercis pour votre gentillesse), Emmanuel Plé ...j'ai eu le plus grand plaisir à travailler et apprendre auprès de vous. Un merci tout particulier à Fred !! Et bien sûr merci à Nathalie, René et Jean-Richard, pour leur sourire et leur gentillesse. J'ai énormément aimé travailler avec Shéhérazade Bentouati, Noëlle Timbart et François Bridey sur le bronze : merci d'avoir cru en mon projet et de m'avoir aidée. Merci aussi à Manon Castelle et à Clément Blanc-Riehl des Archives Nationales qui m'ont ouvert les portes de la sigillographie. Gilles, encore merci d'avoir permis un projet avec Galliera, et merci à Sylvie Brun de m'y avoir accueillie.

Et puis il y a tous ceux qui sont passés puis repartis et avec qui j'ai partagé une expo, un pique-nique ou un paquet de gâteaux : Livane, petite Manon, Hugo, Cécile, Caroline, Tiphaine, Philippe, Solène, Julia, Katerina et bien sûr Diane, Giulia, Kathleen, Odile, Irini... On a été amis trois mois, un an et parfois, plus longtemps. Merci Diane pour ton amitié qui m'est bien précieuse. On n'aura pas eu un bureau à deux, mais qui sait, dans le futur... ! Julia, Katerina, Kathleen, Odile et Irini, nous sommes restées amies, et promis je viens vous voir dès la fin de la thèse. Merci aussi à tous ceux qui ont travaillé avec moi, et qui sont parfois devenus de vrais amis : Jérôme Aubry (un vrai plaisir d'avoir partagé la microtopo avec toi !), Micka Baillet, Michaela Florescu, Gabriel Bernard, Agata Graczyk bien sûr (merci pour ton amitié et ton soutien Agata), et aussi Léa

Jacquelin, Ariane Théveniaud, Lisa Metatla et Alexis Allemand, qui m'a bien aidée sur le scintillant... Que de souvenirs au Louvre pendant ces trois années. Compter les bébés moches avec Camille ; papoter près de la statue qui pleure avec Giulia ; regarder Marion jouer au volley pendant qu'on mange au soleil ; commander des pizzas avec Livane ; manger des glaces aux Tuileries avec Gianluca ; dessiner avec Diane, Giulia et Florian ; faire la danse des crevettes... Le restaurant japonais de la rue Sainte-Anne, les shootings photos au jardin du Palais Royal, les visites « de la cave », les déménagements pour cause de crue (deux en trois ans !), la souris qui mange mon saucisson sec, et toutes nos heures à refaire le monde, dans le sous-sol du Louvre...

Je pense aussi à tous ces gens que j'ai rencontrés pendant ma thèse, en conférence ou en déplacement, et qui sont toujours là à mes côtés : Renée Charrière, Quentin Cridling, Nicolas Dalloz à San Francisco, Anna Andreani, mon amie depuis la CIE Prague. Merci à Madame Katerine Roméo, maître de conférence à l'Université de Rouen, avec qui j'ai rapidement exploré les possibilités de la 2.5D pour la reproduction d'une peinture aborigène, et à Madame Nadine Dutier de la Fédération des Aveugles de France grâce à qui j'ai passé une excellente journée à la Cité de l'Architecture ; merci à Claire Munuera-Ducoq de la Cité de l'Architecture pour son enthousiasme : j'aurais bien aimé que l'on travaille réellement ensemble. Les circonstances ont fait que ce projet n'a pas abouti comme je l'avais espéré, mais il reste une belle découverte et de belles rencontres.

Merci à mes anciens professeurs d'avoir cru en moi et de m'avoir portée et soutenue : en particulier, un grand merci à Thierry Lépine de l'Institut d'Optique à Saint-Etienne et à Monsieur Jacques Debizes, Thalès Angénieux, pour leur amitié ; merci à Mathieu Hébert pour sa présence régulière et ses bons conseils ; merci à Christian Boulinier pour ses encouragements.

Bien sûr un grand merci à mes amis qui sont toujours là : Laura, Lucia, Marie, Inès, Lucie... Alexia, nos mails et ton soutien ces dernières semaines, tu ne sais pas combien ça m'a aidée. Alice, Lucie, merci pour votre affection. Geoffroy, Pierre, Kevin, Jean, Alexis, Chrystelle, Elena... Une pensée particulière pour ma petite Kaoutar qui m'a tant soutenue ces derniers temps.

Enfin, il est difficile de trouver les mots pour remercier toute ma famille, pour leur soutien constant tout au long de mes années d'étude, et plus particulièrement au cours des semaines de septembre octobre qui ont été d'une violence et d'une douleur immenses. Maman, Etienne, merci. Je pense en particulier à mes oncles et tantes, et mes grands cousins pour leur soutien constant. Et bien sûr à mon grand-père, pour sa patience lors de la relecture de ce manuscrit (!), son courage et son énergie à affronter la vie. J'écris ici toute mon admiration et mon affection. Je pense à mes deux grands-mères, à ce que nous avons vécu ces dernières années et ce que nous allons vivre encore. J'espère suivre une voie que vous approuvez. J'ajoute un grand merci à Benjamin Rihet et Stéphane Déricault, chargés de mission au Rectorat d'Amiens, pour leur soutien et leur gentillesse depuis septembre. Enfin, merci bien sûr à Florian pour sa présence et son soutien tout au long de ces trois années, et merci à sa famille et ses amis pour leur gentillesse. Et je pense bien sûr à mon père, qui aurait dû être là ; son départ brutal me plonge dans un désarroi sans borne, mais son exemple continuera à me guider pour toujours.



# Résumé

L'impression 2.5D est une technologie à mi-chemin entre l'impression couleur traditionnelle, à laquelle elle emprunte son procédé et sa qualité de reproduction des couleurs, et l'impression 3D qui crée des reliefs et des formes. Par ses qualités visuelles, l'impression 2.5D pourrait permettre la reproduction réaliste de multiples surfaces. Mais un frein s'oppose à cette perspective : les encres brillent.

Le brillant est un paramètre d'apparence des surfaces, à la double connotation géométrique et perceptuelle : les réflexions lumineuses sont causées par des paramètres physiques (illumination, orientation des facettes qui composent la surface, propriétés des matériaux...), mais leur interprétation appartient au domaine de la cognition. Pour mesurer cet attribut visuel, nous choisissons le glossmètre, instrument très répandu en milieu industriel, et pour compléter ces mesures, nous effectuons la caractérisation en rugosité des échantillons ainsi que de courtes expériences psychovisuelles.

Dans notre étude, nous avons cherché à réduire le brillant des encres en modulant la rugosité des couches imprimées, en fréquence et en amplitude. Cette modulation a entraîné des problématiques annexes, comme l'effet scintillant ou la gestion de la couleur mate, auxquelles nous proposons des solutions. Notre travail aboutit à la prédiction et à l'uniformisation des niveaux de brillant coloré.

Enfin, nous avons appliqué nos protocoles à des cas concrets issus de la conservation – restauration du patrimoine. Plusieurs exemples distincts sont présentés dans ce manuscrit, chacun d'entre eux abordant un point particulier sur lequel l'impression 2.5D pourrait venir en aide au restaurateur, au muséographe ou à l'archiviste. Pour rendre ces applications envisageables, nous discutons de la pertinence de cette technologie en regard de l'éthique de la conservation – restauration du patrimoine.

**Mots clés : Impression 2.5D en couleur avec encres, Réduction du brillant, Surfaces mates, Scintillement, Acquisition 3D, Rugosité à micro-échelle, BRDF, Restauration du patrimoine.**



# Abstract

2.5D printing is a cross between traditional color printing, for the process and its visual quality, and 3D printing, which makes forms and reliefs by ink superposition. Because of its properties, 2.5D printing could allow the realistic reproduction of objects and surfaces, but inks are glossy.

Gloss is an appearance parameter of surfaces, with both a geometrical and a perceptual sense: luminous reflections are due to physical parameters (illumination, roughness, material properties...) but their interpretation belongs to cognitive science. In our study, we sought to reduce the ink glossy reflections by modulating the roughness of printed layers, in frequency and amplitude. This modulation carried others issues we solved, as sparkling or matte color management. The glossmeter was used to measure the gloss, as it is both the most common instrument in industry and the most adapted to our case. To complete these measurements, we made systematic roughness analysis of samples and some psycho-visual experiments. Our work succeeded in the prediction of matte colored aspects and in the standardization of matte colored surfaces.

Finally, we applied our protocols to case studies from conservation and restoration of Cultural Heritage. Distinct examples are presented here, where 2.5D printing could help the conservator, the curator or the archivist. We discussed the relevance of the 2.5D technology, compared to the Cultural Heritage ethic.

**Keywords: Glossy, Matte, Relief Printing, Roughness, Color, Visual Perception, BRDF, Cultural Heritage, Conservation and Restoration.**



*« Il y a assez d'énergie en chacun pour accomplir ce dont il  
est convaincu »*

*Johann Wolfgang von Goethe.*



# Table des matières

Remerciements .....	5
Résumé .....	9
Abstract.....	11
Liste des tableaux .....	21
Liste des figures .....	25
Liste des annexes.....	47
Introduction générale .....	49
1. Contexte industriel : l'impression couleur .....	49
2. Vers la reproduction de l'apparence .....	51
3. Problématique.....	52
Partie A – Apparence des matériaux mats .....	57
Chapitre A.1. Production d'objets mats.....	59
1. Esthétique du mat : le brillant en négatif .....	60
1.1 Attrait pour l'éclat .....	60
1.2 Le retour du mat.....	71
1.3 Disparition de la couleur ?.....	79
1.4 Transition.....	84
2. Objets mats .....	84
2.1 Procédés de fabrication traditionnels .....	84
2.2 Cadre du patrimoine .....	90
3. Conclusion.....	95
Chapitre A.2. Définir, mesurer et reproduire les aspects de surface mats.....	97
1. Brillant et mat .....	98
1.1 Définitions générales.....	98
1.2 Réflexion à une interface .....	99
1.3 Le brillant .....	103
2. Rugosité.....	111
2.1 Définitions générales.....	111
2.2 Diffusion et rugosité.....	120
2.3 Instrumentation .....	122
3. Reproduire l'apparence .....	125
3.1 Simuler l'apparence grâce à la rugosité.....	125

3.2	Imprimer l'apparence .....	127
4.	Conclusion.....	129
Partie B – Optimisation des performances d'un système d'impression en relief : faire du mat		
.....		133
Chapitre B.1. L'impression en relief .....		135
1.	Généralités.....	136
1.1	L'impression 3D .....	136
1.2	L'impression 2.5D : un procédé hybride.....	139
1.3	Paramètres.....	143
2.	Premiers constats en rugosité et en brillant.....	146
2.1	Protocole.....	146
2.2	Influence des paramètres d'impression sur la rugosité et le brillant.....	148
2.3	Influence des paramètres d'impression sur le relief.....	155
2.4	Conclusions.....	159
3.	Défi de la gestion de l'apparence pour les technologies additives.....	160
4.	Conclusion.....	161
Chapitre B.2. Relief des imprimés .....		163
1.	Méthodes d'analyse .....	164
1.1	Méthodes connues.....	164
1.2	Fonction de transfert de modulation (FTM).....	164
1.3	Cas de l'impression.....	166
1.4	Intérêt de la FTM : rétroaction.....	168
1.5	Que faire pour analyser les hauteurs ?.....	169
2.	Protocole expérimental.....	169
2.1	Echantillons .....	169
2.2	Impression.....	171
2.3	Mesure des hauteurs .....	172
2.4	Calcul de la FTMH.....	173
3.	Résultats .....	174
3.1	Aspect des courbes.....	174
3.2	Hauteurs atteintes.....	175
3.3	FTMH.....	175
3.4	Transition.....	178

4.	Compensation .....	178
5.	Conclusion.....	181
5.1	Limites .....	181
5.2	D'un point de vue industriel .....	181
5.3	Perspectives .....	182
Chapitre B.3. Brillant des imprimés .....		185
1.	Structures mates.....	186
1.1	Etat de l'art .....	186
1.2	Configurations.....	186
1.3	Influence de la hauteur des piliers sur le brillant .....	190
1.4	Influence des paramètres d'impression sur le brillant.....	192
1.5	Transition.....	193
2.	Etude en rugosité .....	194
2.1	Topographies réelles .....	194
2.2	Paramètres de rugosité.....	198
2.3	Transition.....	202
3.	A propos de la mesure du brillant spéculaire .....	202
3.1	Différents effets visuels présents .....	202
3.2	Bien-fondé de la mesure spéculaire .....	205
3.3	Brillant spéculaire et perception visuelle du mat.....	208
4.	Scintillant .....	211
4.1	Définir l'effet scintillant .....	212
4.2	Effet scintillant de nos imprimés .....	215
5.	Conclusion.....	225
5.1	D'un point de vue industriel .....	225
5.2	D'un point de vue métrologique .....	226
5.3	Limites.....	226
Chapitre B.4. Couleur des imprimés mats .....		229
1.	Métrologie de la couleur et du brillant coloré .....	230
1.1	Mesure de la couleur .....	230
1.2	Mesure du brillant coloré.....	230
2.	Couleur des imprimés mats .....	233
2.1	Stratégies d'impression .....	233

2.2	Position du problème.....	237
3.	Modélisation des niveaux de brillant des mélanges colorés.....	245
3.1	Comprendre la couleur en impression.....	245
3.2	Protocole.....	247
3.3	Influence de la couverture d'encre sur le niveau de brillant.....	250
3.4	Influence des pourcentages relatifs en encre sur le niveau de brillant.....	252
4.	Gestion de la couleur mate.....	259
4.1	De l'objet à l'imprimé.....	259
4.2	Profil ICC et gamut de la couleur mate.....	261
5.	Conclusion : workflow de l'apparence.....	262
Partie C – Reproduction de matériaux mats réels.....		267
Chapitre C.1. Réflexions sur l'utilisation de l'impression 2.5D dans le domaine du patrimoine culturel.....		269
1.	Quantifier, restaurer, reproduire.....	270
1.1	La mesure de l'apparence pour le patrimoine.....	270
1.2	Reproduire un objet ou une partie d'objet.....	270
1.3	Cas des comblements.....	274
2.	Compatibilité de l'impression 2.5D avec les critères de la restauration.....	279
2.1	Théorie de la restauration.....	279
2.2	Quel statut pour une impression 2.5D ?.....	282
2.3	Impression 2.5D et critères de la restauration.....	283
3.	Démarche : de l'objet à l'imprimé.....	285
3.1	Acquisition des paramètres d'apparence.....	286
3.2	Choix de la bonne stratégie d'impression.....	287
3.3	Critère de satisfaction.....	292
4.	Conclusion.....	292
Chapitre C.2. Applications.....		295
1.	Le plâtre comme cas d'école.....	296
2.	Les boutons de vêtements.....	299
2.1	Genèse du projet.....	299
2.2	Le bouton.....	299
2.3	Etude préparatoire.....	303
2.4	Boutons choisis.....	308

3.	Le bandage de roue en bronze .....	309
3.1	Genèse du projet.....	309
3.2	L'objet : un bandage de roue .....	309
3.3	Acquisition de l'apparence .....	314
3.4	Création du comblement.....	319
3.5	Imprimés réalisés .....	323
3.6	Perspectives .....	325
4.	Les matrices de sceaux.....	326
4.1	Genèse du projet.....	326
4.2	Sceaux et matrices de sceaux.....	326
4.3	De l'imagerie à l'impression en relief.....	329
4.4	Conclusion .....	334
5.	Le bestiaire médiéval pour les malvoyants .....	334
5.1	Créer un relief « lisible sous les doigts ».....	334
5.2	L'exemple de la salamandre .....	335
5.3	Perspectives .....	336
6.	Conclusion.....	337
	Conclusion générale .....	339
1.	Rappel de la problématique.....	339
2.	Instrumentation .....	339
3.	Etudes réalisées et résultats .....	340
4.	Limites et perspectives .....	342
4.1	Du point de vue industriel .....	342
4.2	Du point de vue métrologique .....	343
4.3	Imprimer un brillant, imprimer une BRDF, imprimer un matériau .....	344
4.4	Rhéologie.....	344
5.	Applications au domaine du patrimoine .....	345
6.	Conclusion.....	345
	Bibliographie.....	347
	Annexes .....	359



# Liste des tableaux

Table A.1 1 – Synonymes et antonymes du mot « brillant ».....	62
Table A.1 2 – Vocabulaire du brillant et du mat en latin et dans deux langues indo-européennes germaniques, l’anglais et l’allemand [10, 11, 12]. .....	63
Table A.1 3 – Blanc et noir en latin et dans deux langues germaniques anciennes [10, 11, 12]. .....	80
Table A.1 4 – Quelques matériaux, naturellement brillants ou mats, travaillés ou non.....	91
Table A.1 5 – Classification de quelques matériaux du patrimoine.....	92
Table A.1 6 – Résumé des différentes méthodes pour « faire du mat ».....	96
Table A.2 1 – Classes de brillant énoncées par R.S. Hunter en 1937 [45, 44]. .....	104
Table A.2 2 – Paramètres de rugosités usuels, définis conformément à la norme ISO 4287 dans le cas des profils. ....	116
Table A.2 3 – Paramètres de rugosités usuels, définis conformément aux normes ISO 25178 dans le cas des surfaces. ....	118
Table A.2 4 – Tableau comparatifs de différentes techniques de mesure de la rugosité. Inspiré de [74]. .....	123
Table B.1 1 – Tableau comparatif des différents procédés 3D.....	138
Table B.1 2 – Performances à ce stade des différents procédés d’impression. ....	141
Table B.1 3 – Canaux couleurs de l’imprimante.....	144
Table B.1 4 – Temps d’exposition aux UV. ....	144
Table B.1 5 – Directions d’impression. ....	145
Table B.1 6 – Hauteurs des gouttes.....	145
Table B.1 7 – Paramètres d’intérêt. ....	146
Table B.1 8 – Nombre de gouttes, largeur de la goutte principale et largeur moyenne des gouttes satellites, pour trois niveaux de gouttes, chacun aux temps d’exposition aux UV minimal, intermédiaire et maximal. Tous les résultats sont moyennés sur cinq tests. ....	154

Table B.1 9 – Taille réelle des gouttes, pour chacune des encres, déduite des hauteurs moyennes des bandes mesurées à la fréquence 2.5 cycles / pouce – sachant que 10 couches ont été imprimées dans tous les cas. Le niveau de goutte 3 était donné à 5.28 $\mu\text{m}$ .	157
Table B.1 10 – Taille réelle des gouttes, pour chacune des encres, déduite des hauteurs moyennes des bandes mesurées à la fréquence 2.5 cycles / pouce – sachant que 28 couches ont été imprimées à la taille 1, 10 couches à la taille 3 et 6 couches à la taille 5. Pour rappel, le niveau de goutte 5 était donné à 8.8 $\mu\text{m}$ .	159
Table B.1 11 – Paramètres d'intérêt.	160
Table B.1 12 – Méthodes pour « faire du mat » et faisabilité en impression 2.5D.	161
Table B.2 1 – Couples de hauteur ( $H_{max}$ ; $H_{min}$ ), triés par ( $H_{max} - H_{min}$ ) croissants. ..	171
Table B.2 2 – Valeurs de brillant spéculaire à 60° en Gloss Units (GU) obtenues sur une plaquette imprimée au niveau de goutte 1	183
Table B.3 1 – Paramètres de mailles, taux de couverture de la surface et motif de chacune des 12 configurations implémentées.	189
Table B.3 2 – Modèles empiriques issus des courbes expérimentales qui décrivent l'allure du brillant spéculaire à 60° en fonction de la hauteur $h$ des piliers implémentés.	192
Table B.3 3 – Paramètres d'acquisition des surfaces rugueuses utilisés sur la station de microtopographie.	194
Table B.3 4 – Microtopographies choisies des configurations A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K et L imprimées à la hauteur 50 $\mu\text{m}$ . L'échelle est la même pour toutes les configurations (47 $\mu\text{m}$ au maximum).	196
Table B.3 5 – Microtopographies choisies, pour la seule configuration I, imprimée aux hauteurs 10, 25, 50, 65, 80 et 100 $\mu\text{m}$ . Attention, l'échelle couleur change selon les configurations.	197
Table B.3 6 – Modèle empirique issu de la courbe expérimentale qui décrit l'allure du brillant spéculaire à 60° en fonction de la rugosité quadratique $Sq$ des surfaces.	202
Table B.3 7 – Prises de vue sous le microscope numérique Hirox™ des configurations A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K et L imprimées à la hauteur 50 $\mu\text{m}$ . La barre d'échelle signale 1 mm.	204

Table B.3 8 – Répartition des participants.....	209
Table B.3 9 – Résultats du test psycho-visuel. ....	210
Table B.3 10 – Classement qui découle des résultats du test psycho-visuel. ....	210
Table B.3 11 – Sélection de prises de vue réalisées à trois configuration angulaire : 0° (échantillon à plat), 12° (spéculaire) et 24° pour les échantillons cyan sans piliers, et avec piliers E, G et I.....	217
Table B.3 12 – Sélection de prises de vue réalisées à trois configuration angulaire : 0° (échantillon à plat), 12° (spéculaire) et 24° pour les échantillons à piliers réguliers G et I, et à piliers aléatoires de style G et I.....	219
Table B.3 13 – Sélection de prises de vue réalisées à trois configuration angulaire : 0° (échantillon à plat), 12° (spéculaire) et 24° pour les configurations E aux hauteurs 50 µm et 80 µm, puis pour les configurations E_1, E_2 et E_3 à doubles hauteurs. ....	221
Table B.3 14 – Sélection de prises de vue réalisées à trois configuration angulaire : 0° (échantillon à plat), 12° (spéculaire) et 24° pour la configuration E imprimée aux temps d'exposition aux UV minimal, intermédiaire et maximal.....	223
Table B.3 15 – Sélection de prises de vue réalisées à trois configuration angulaire : 0° (échantillon à plat), 12° (spéculaire) et 24° pour la configuration I imprimée au niveau de goutte 1 et aux trois niveaux de gouttes successifs 1, 3 et 5. ....	224
Table B.4 1 – Performances du spectromètre Xrite™ Ci62 utilisé. Données de calibrage fournies par Xrite™ en octobre 2017. ....	230
Table B.4 2 – Valeurs de gloss mesurées (en GU) pour 3 surfaces exemples ; valeurs de clarté correspondantes ; déviations calculées grâce à ces clartés ; gloss corrigé résultant.....	232
Table B.4 3 – Stratégies d'impression couleur. Les hauteurs des piliers sont fixées à 80 µm, sauf dans le cas 4, où la hauteur des piliers blancs est à 70 µm et la hauteur des piliers en vernis à 10 µm. ....	234
Table B.4 4 – Comparaison des stratégies 1 et 4 avec une couche à piliers monochromatique cyan et une couche cyan simple. ....	236
Table B.4 5 – Résultats du test psycho-visuel sous éclairage diffus.....	237
Table B.4 6 – Résultats du test psycho-visuel sous éclairage directionnel.....	237
Table B.4 7 – Nombres de patches imprimés sur des piliers blancs de hauteur 80 µm à analyser en brillant et en couleur.....	249

Table B.4 8 – Modèles empiriques issus des courbes expérimentales qui décrivent l’allure du brillant spéculaire à 60° en fonction des pourcentages relatifs d’encre, pour des mélanges à deux encres. On utilise la lettre <i>C</i> pour désigner le taux de couverture en encre cyan, <i>M</i> pour le magenta, <i>J</i> pour le jaune et <i>N</i> pour le noir. ....	254
Table B.4 9 – Valeurs des coefficients dans le cas des mélanges mats à deux encres. ....	254
Table B.4 10 – Valeurs des coefficients dans le cas des mélanges mats à trois encres (ici Cyan – Magenta – Jaune). ....	257
Table B.4 11 – Valeurs des coefficients dans le cas des mélanges mats à quatre encres. ....	258
Table B.4 12 – Caractéristiques d’apparence de l’objet réel et de l’imprimé. ....	259
Table C.2 1 – Raisons de l’élimination de 7 des boutons sélectionnés. ....	304
Table C.2 2 – Caractéristiques des boutons tests. ....	305
Table C.2 3 – Boutons tests, scans effectués sous scanner à lumière structurée et cartographies résultantes. ....	306
Table C.2 4 – Brillant spéculaire à 60° déduit de la comparaison avec la NCS Gloss Scale™ pour les 5 boutons sélectionnés, auxquels nous avons ajouté ici le bouton n°6. ....	307
Table C.2 5 – Brillant spéculaire à 60° mesuré au glossmètre sur les fragments n°6 et 9. La mesure a été répétée plusieurs fois dans plusieurs directions puis moyennée. ....	315
Table C.2 6 – Caractéristiques physiques des matrices et du sceau sélectionnés. ....	329

## Liste des figures

- Figure A.1 1 – Eclats brillants naturels. (a) Petit colibri d’Anna. Image : R. Dudley pour le National Geographic. (b) Coléoptère. Image : udec.ru.....64
- Figure A.1 2 – Métaux brillants et pierres précieuses. (a) Série de métaux précieux et brillants, Image : wikipedia.fr. (b) Collier René Lalique. Image : Lalique. ....65
- Figure A.1 3 – Un repas populaire, vaisselle mate, et un repas huppé, vaisselle en argent. Noter la chope en étain, qui imite à bas prix une vaisselle de meilleure qualité. (a) Jacob Jordaens, *Le Mangeur de bouillie*, détail, 1652, huile sur toile, musée des Beaux-Arts de Strasbourg. Image : akg-images.fr. (b) Jean-François de Troy, *Le déjeuner de chasse*, détail, 1737, huile sur toile, R.F. 1990-18, musée du Louvre. Image : H. Lewandowski, RMN Grand Palais.....66
- Figure A.1 4 – Classification périodique des éléments. Les métaux brillants sont très nombreux sur terre – ils ont été surlignés selon leur couleur, mais la plupart d’entre eux ne se trouvent pas à l’état simple : ils sont combinés avec d’autres éléments. Le fer est l’élément le plus abondant, ce qui explique son coût bas. Il présente un aspect brillant une fois travaillé. Le nickel comme le zinc ou le cuivre sont moyennement abondants. Le platine, l’argent ou l’or sont beaucoup plus rares et nettement plus brillants.....66
- Figure A.1 5 – Brillant et eau. (a) Paire de lunettes de soleil ultra brillantes. Image : Knockaround. (b) Smartphone satiné. Image : Apple. (c) Paysage aquatique du Grüner See, Autriche, Image : Marc Henauer pour le National Geographic.....67
- Figure A.1 6 – La pie voleuse des Bijoux de la Castafiore, par Hergé. Image : fr.tintin.com..68
- Figure A.1 7 – (a) Violon Nicolas Amati, en acajou verni. Image : blog.violon.com. (b) Carafe de vin, grès glaçuré, imitation céladon. Dynastie Goryeo, XIIème siècle, site de Sadang-ri, Corée, C.419-1984, Fitzwilliam Museum, Cambridge. Image : M. Page, C2RMF, 2017.....69
- Figure A.1 8 – Deux représentations d’un visage humain stylisé et brillant, à 5000 ans d’écart. Rapprochement fait par [4]. (a) Figure féminine en marbre lisse et brillant, art cycladique ancien II, 3<sup>ème</sup> millénaire av. J.-C., Ma 2709, Musée du Louvre. Image : franceculture.fr. (b) Brancusi, *La Muse endormie*, 1910, bronze poli, AM 1374 S, Centre Pompidou. Image : Adam Rzepka, Centre Pompidou, MNAM-CCI, Dist. RMN-GP.....69

Figure A.1 9 – Reflets pupillaires. (a) Un portrait du Fayoum, I <sup>er</sup> -IV <sup>ème</sup> siècle ap. J.-C., encaustique sur bois. (b) Véronèse, <i>Portrait d'une Vénitienne, dite La Belle Nani</i> , vers 1560, huile sur toile, R.F. 2111, musée du Louvre. Image : E. Lessing, Musée du Louvre. ....	70
Figure A.1 10 – Reflets aquatiques. (a) Claude Monet, <i>Soleil levant (marine)</i> , 1873, huile sur toile. Image : J.P. Getty Museum. (b) Photographie du port de plaisance de Pornichet Image : lavielabaule.fr. ....	71
Figure A.1 11 – Deux illustrations du style « bling bling ». (a) Un rappeur américain, image : quora.com. (b) Lady Gaga en 2013, image : plurielles.fr. ....	71
Figure A.1 12 – L'attraction pour le brillant poussée à ses extrêmes pathologiques... (a) Gollum, personnage du Seigneur des Anneaux, dans sa version cinématographique signée Peter Jackson. Image : saganomringen.wikia.com (b) L'Or du Rhin, opéra de Richard Wagner, inspiré d'une légende germanique. Image : wikipedia.fr.....	72
Figure A.1 13 – Peinture mate. (a) Intérieur mat proposé par Tollens. Image : tollens.com. (b) Rayonnages d'un magasin de bricolage. Image : M. Page, C2RMF, 2017. ....	73
Figure A.1 14 – Exemple de difficultés de lecture de l'information. (a) Reflets sur des lunettes. Image : sciencesetavenir.fr. (b) Reflet d'une fenêtre sur la vitre du <i>Jeune homme au gant</i> , Titien, Musée du Louvre. Image : M. Page, C2RMF, 2017.....	73
Figure A.1 15 – Aspects plastiques. (a) et (b) Bakélite, Images : Pinterest. (c) Paillettes en plastiques. Image : nationalgeographic.fr. ....	74
Figure A.1 16 – Publicités présentant le rendu mat des iPhone 7. Notez en (a) l'association subtile faite par le publiciste du téléphone avec le bois, matière noble par excellence !	75
Figure A.1 17 – Vaisselle mate, à nouveau mise en valeur par du bois rugueux. ....	76
Figure A.1 18 – Le contraste entre les deux représentations témoigne des qualificatifs accordés au brillant et au mat. (a) <i>Vierge et Christ en majesté</i> , inondés de lumière ; Giovanni Di Marco, dit Giovanni Dal Ponte, détail d'un panneau de bois, Quattrocento, Galerie de l'Académie, Florence. (b) <i>Vierge à l'enfant d'une étonnante sobriété</i> , dit <i>Madone Grecque</i> , Giovanni Bellini, 1460-1464, tempera sur panneau de bois, Pinacothèque de Brera, Milan. Images : M. Page, C2RMF, 2018. ....	77
Figure A.1 19 – Effets de matière par le contraste mat/brillant. (a) Giovanni Bastianini, <i>Buste d'une jeune fille</i> , marbre, XIX <sup>ème</sup> s., Inv. 5398, Palais Pitti, Florence. (b) Détail de la manche. Images : M. Page, C2RMF, 2018. ....	77

Figure A.1 20 – Fort contraste entre le corps lisse et brillant de la Danaïde et le rocher rugueux sur lequel elle s’appuie. Rodin, <i>La Danaïde</i> , 1889, marbre, Ph. 03733, musée Rodin. Image : Christian Baraja, Musée Rodin.....	78
Figure A.1 21 – Noir brillant et noir mat, Cristóbal Balenciaga. (a) et (b) issues de l’exposition <i>Balenciaga, L’œuvre au Noir</i> , présentée au Musée Bourdelle au printemps 2017. Images : M. Page, C2RMF, 2017.....	78
Figure A.1 22 – Exemples de costumes sombres aux reflets brillants de l’aristocratie. Les tissus employés sont luxueux. (a) Van Dyck, <i>Portrait d’Anna Wake</i> , 1628, huile sur toile, Inv. 240, Mauritshuis. Image : Mauritshuis, La Haye. (b) Van Dyck, <i>Portrait de Jacques le Roy</i> , 1631, huile sur toile, Inv. 135 (1929.9), musée national Thyssen-Bornemisza, Madrid. Image : Musée National Thyssen – Bornemisza. (c) Van Dyck, <i>Portrait de Diana Cecil</i> , 1638, huile sur toile, Inv. P001481, musée du Prado, Madrid. Image : Musée du Prado. ....	82
Figure A.1 23 – Couleurs versus noir et blanc. (a) Frères de Limbourg , <i>Les Très Riches Heures du Duc de Berry</i> , mois de mai, 1412-1416, peinture sur velin, MS.65, musée Condé, château de Chantilly. Image : R.-G. Ojéda, R.M.N. (b) Détail d’un défilé de mode contemporain, Alexandre Vauthier, printemps-été 2013. Image : luxe.supdepub.com. ....	83
Figure A.1 24 – (a) Couleurs des voitures en 2015. Le noir, le gris (également dans sa version argenté) et le blanc dominant largement le marché. Ce que le graphique ne dit pas, c’est que le brillant des peintures change ! Image : DuPont Automotive Systems. (b) Un exemple de variations de brillant, sur des voitures noires. Image : M. Page, C2RMF, 2018.....	83
Figure A.1 25 – Verres dépolis issus de la plaquette de présentation des verres mats Saint-Gobain et obtenus par matage à l’acide. ....	85
Figure A.1 26 – Photographies au microscope électronique à balayage de surfaces en silice hybride créées par nano-impression lithographique. Figure intégrée dans le manuscrit [32]. Image : C. Turbil, UMR Saint-Gobain / CNRS-Surface du verre et Interfaces. ....	85
Figure A.1 27 – Piliers implémentés dans une structure en verre, par impression nano-lithographique. Le verre résultant est plus ou moins mat, selon la densité de piliers construits [33].....	86
Figure A.1 28 – Cristal Lalique. (a) Cristal avant et après matage. (b) Etape de satinage sous meule. Images : Musée Lalique.....	86

Figure A.1 29 – Vernis brillant et féculé de pomme de terre. Image : sortezdevosconapts.com. .....	87
Figure A.1 30 – Vue à la loupe binoculaire de deux surfaces peintes. (a) Peinture dite « mate », vendue dans le commerce par Pébéo™. (b) Peinture dite « brillante », également Pébéo™. ....	88
Figure A.1 31 – Texture d'un essai de recréation du bleu Klein effectué par Gabriel Bernard. (a) Couleur de l'IKB. Image : encycolorpedia.fr. (b) Topographie précise de la texture d'une recréation sur 50 x 50 µm. Image : G. Bernard, C2RMF, 2017. ....	88
Figure A.1 32 – Effets de matière. Il est possible que la texture mate s'explique par la présence nécessaire d'un support rugueux auquel la polychromie peut adhérer. Ou alors s'agit-il d'un choix esthétique ? (a) Tête rugueuse et mate de la Vénus d'Arles, Ier siècle av. J.-C., Musée du Louvre. (b) Corps brillant de la Vénus de Vienne, I <sup>er</sup> -II <sup>ème</sup> siècle après J.-C., Musée du Louvre. Images : M. Page, C2RMF, 2018. ....	89
Figure A.1 33 – Trois armures très utilisées : (a) l'armure toile, (b) l'armure serge et (c) l'armure satin. Images : wikipedia.fr. ....	90
Figure A.1 34 – Pastel contre huile sur toile. La structure granuleuse du pastel donne un rendu mat très caractéristique, tandis que l'huile qui confère une surface lisse (et de plus vernie) a un rendu brillant. (a) Maurice Quentin de la Tour, <i>Portrait d'une inconnue</i> , pastel. Image : pinterest.com. (b) Elisabeth Vigée-Lebrun, <i>Autoportrait</i> , détail, 1790, huile sur toile. Image : artrenewal.org. ....	93
Figure A.1 35 – Miroirs en bronze à deux états de conservation. (a) Miroir égyptien en bronze, 1200 av. J.C. Image : C. Decamps, Musée du Louvre. (b) Miroir grec en bronze, 490-480 av. J.C., Musée du Louvre. Image : H. Lewandowski, RMN. ....	94
Figure A.1 36 – Argile, porcelaine et céramique glaçurée. (a) Tablette d'argile, Suse V, 1800-1600 av. J.C., Musée du Louvre. Image : F. Raux, RMN, 2005. (b) Porcelaine de Saint-Cloud, 1700-1710, Musée des Arts décoratifs. (c) carreau de céramique glaçurée islamique, Musée du Louvre. Images : wikipedia.fr. ....	94
Figure A.1 37 – Cuivre et bronze à différents états de corrosion. (a) Pièce en cuivre provenant de Crète. Image : fracademic.com. (b) Boucle de ceinture en bronze, fin du VI <sup>ème</sup> siècle. Image : G. Blot, RMN. ....	95
Figure A.2 1 – Attributs de premier et de second ordres de l'apparence ; cas d'étude simple.	99

Figure A.2 2 – Evolution du facteur de réflexion avec l’angle d’incidence, pour une lumière naturelle et une interface air/verre par exemple (indice du milieu $n = 1.5$ ). .....	102
Figure A.2 3 – Conventions angulaires pour l’écriture de la BRDF. ....	102
Figure A.2 4 Courbes de luminance directionnelle établies par Obein à l’EZ-Contrast™ pour (a) une surface rugueuse et mate et (b) une surface lisse et brillante. Les pics ont non seulement une amplitude très différente, mais aussi une largeur à mi-hauteur nettement contrastée. Le pic établi pour une surface rugueuse est large et étalé ; le pic établi pour une surface lisse est très fin et droit, bien dirigé dans la direction spéculaire. ....	105
Figure A.2 5 – Principe du glossmètre, d’après Hunter [49], cité par [32]. ....	106
Figure A.2 6 – Percevoir le brillant. Figure extraite de [41]. ....	108
Figure A.2 7 – Sensation visuelle et brillant spéculaire. (a) Echelle issue de Judd & Hunter [53]. (b) Echelle issue de Obein [44]. ....	109
Figure A.2 8 – Masques utilisés et influence sur des objets de même brillant (seconde ligne) ou de brillants différents (deux dernières lignes). Figure extraite de [54]. ....	109
Figure A.2 9 – Ondulation et rugosité. Adapté de [62]. ....	112
Figure A.2 10 – Principe du filtrage. D’après [63]. ....	112
Figure A.2 11 – Effets de différentes valeurs de cut-off sur un même profil. Figure extraite de [64]. Plus la valeur du cut-off augmente, plus l’ondulation tend à « s’écraser » pour ne plus donner que la forme. A l’opposé, la rugosité prend de plus en plus de détails en compte. Il faut décider à quelle échelle on va travailler. ....	113
Figure A.2 12 – Longueur d’évaluation $L$ et longueurs de base $li$ . Source [62]. ....	114
Figure A.2 13 – Ligne moyenne. ....	115
Figure A.2 14 – Exemples de profils très différents mais qui ont la même valeur de $Ra$ [73]. ....	115
Figure A.2 15 – Aspects des profils selon leur (a) asymétrie ou (b) aplatissement. [73]. ....	117
Figure A.2 16 – Fonction et longueur d’autocorrélation, adapté de [73]. ....	119
Figure A.2 17 – Diffusion en fonction d’un angle pour plusieurs surfaces, composées du même matériau, mais de rugosité différentes [76, 41]. La surface lambertienne est logiquement la plus diffusante. Les autres surfaces s’échelonnent selon leur rugosité, des moins rugueuses ( $R1, R2$ ) aux plus rugueuses ( $R6, R7$ ). On reste dans le cas des surfaces peu rugueuses : $Rq \ll \lambda \cos(\theta_i)$ . ....	121
Figure A.2 18 – Principe du microscope confocal à codage chromatique. [79] ....	124
Figure A.2 19 – Surfaces modélisées grâce au modèle de Cook-Torrance [82]. ....	126

Figure A.2 20 – Image réelle et sa simulation selon un modèle lambertien simple et selon le modèle d'Oren-Nayar. Le modèle d'Oren-Nayar représente de manière bien plus exacte la réflexion diffuse due à la rugosité de surface. [83].....	127
Figure A.2 21 – Divers exemples issus de [86]. Réflectance souhaitée par l'utilisateur, micro-facettes équivalentes et photographie de la réflexion produite sous éclairage directionnel. ....	128
Figure A.2 22 – Réflectance d'entrée et réflectance de sortie. Figure extraite de [92]......	129
Figure B.1 1 – Etapes de l'impression 3D. Le fichier 3D peut être issu d'un scan, ou créé numériquement sur un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO).....	136
Figure B.1 2 – Exemples d'imprimés 3D. Objets imprimés par (a) le procédé CLIP et (b) le procédé FDM. Images : 3dnatives.com. (c) Personnages colorés imprimés par Binder Jetting. Image : sculpteo.com.....	139
Figure B.1 3 – L'imprimante 2.5D « Mofrel » développée par Casio™, présentée à l'automne 2017. On voit en (b) que les surfaces brillent. Le matériau n'est pas vraiment réaliste... Images : 3dnatives.com.....	139
Figure B.1 4 – Relief créé par le procédé 2.5D. Sur la couche qui forme le « relief », elle-même formée de plusieurs couches d'encre, peuvent être superposées d'autres couches, colorées par exemple.....	140
Figure B.1 5 – Exemples de textures réalistes réalisées par Océ PLT™ : brique, paille et cuir. On distingue quelques effets de brillants, surtout sur la paille et le cuir. Image : www.imaging-resource.com. ....	141
Figure B.1 6 – Exemple d'application en muséographie : (a) ronde-bosse 3D portée en (b) imprimé 2.5D. (a) Tête royale d'Oba, collections du musée Picasso, exposition « Picasso et les Arts Premiers », musée du Quai Branly, 2017. (b) Imprimé en relief réalisé grâce au mécénat de la fondation Mikli. Image : M. Page, C2RMF, 2017.....	142
Figure B.1 7 – Le papier peint embossé existe depuis le XIX <sup>ème</sup> siècle. (a) et (c) La presse à embosser et le catalogue de l'entreprise britannique Anaglypta™. Images : anaglypta.co.uk (b) Un papier peint moderne de la firme britannique Lincrusta™. Image : lincrusta.com. Le lincrusta™ est inventé en 1877 par le fils de l'inventeur du linoléum ! Il s'agit d'un revêtement mural très en relief, lavable, à l'aspect plastique, composé de pulpe de bois et d'huile de lin. ....	143

Figure B.1 8 – Création d’un relief. Carte d’élévation et fichier couleur exemples, donnent un patch à bandes jaunes.....	144
Figure B.1 9 – Table d’impression et directions.....	145
Figure B.1 10 – Protocole A. L’encre C, M, Y, K ou W est apposée en 1, 2 ou 5 couches, et séchée sous les trois temps d’exposition aux UV. Le niveau de goutte est fixé à 5.....	147
Figure B.1 11 – Protocole B. L’encre C est sélectionnée, et les patches sont imprimés en faisant varier le temps d’exposition aux UV, et le niveau de goutte, pour trois hauteurs de couche différentes.....	147
Figure B.1 12 – Protocole C. Les fréquences choisies sont 2.5 cycles / pouce, 5 cycles / pouce et 25 cycles / pouce. Toutes les encres sont testées. Pour les patches cyan, la taille de goutte, le temps d’exposition aux UV et la direction d’impression sont également considérés.....	148
Figure B.1 13 – Résultats du Protocole A. Pour les cinq encres, le brillant a été mesuré à 60°. Il est tracé ici en fonction du temps d’exposition aux UV, pour 1, 2 et 5 couches d’encre déposées. La répétabilité est inférieure à 2 GU.....	149
Figure B.1 14 – Prises de vue au microscope numérique. Cas à 1 couche, encres cyan et magenta, niveau de goutte 5. Les UV varient. La barre d’échelle figurée en noir équivaut à 500 µm.....	150
Figure B.1 15 – Rugosité quadratique moyenne en fonction du temps d’exposition aux UV, pour 1 couche d’encre cyan, magenta, jaune, noire et blanche, au niveau de goutte 5. .	150
Figure B.1 16 – Rugosité quadratique moyenne en fonction du nombre de couches imprimées, pour les encres cyan, magenta, jaune, noire et blanche, au niveau de goutte 5 et au temps d’exposition aux UV minimal.....	151
Figure B.1 17 – Prises de vue au microscope numérique. Encres cyan et magenta, niveau de goutte 5, temps d’exposition minimal. Le nombre de couches varie. La barre d’échelle figurée en noir équivaut à 500 µm.....	151
Figure B.1 18 – Niveau de brillant des cinq encres, en fonction du nombre de couches apposées et du temps d’exposition aux UV.....	152
Figure B.1 19 – Gloss et rugosité quadratique moyenne en fonction du nombre de couches imprimées, pour l’encre cyan, au temps d’exposition aux UV minimal. Le nombre de couches et le niveau de goutte varient.....	153

Figure B.1 20 – Prises de vue au microscope numérique. Encre cyan, temps d’exposition minimal, une couche imprimée. Le niveau de goutte varie. La barre d’échelle figurée en rouge équivaut à 500 $\mu\text{m}$ .....	153
Figure B.1 21 – Taille des gouttes. Images représentatives choisies parmi les $3 \times 3 \times 5$ prises de vue effectuées sous microscope numérique.....	154
Figure B.1 22 – (a) Profil obtenu sur le patch cyan à la fréquence 5 cycles / pouce, niveau de goutte 3, exposition aux UV minimale. (b) Profil obtenu sur le patch magenta dans les mêmes conditions. ....	155
Figure B.1 23 – (a) Hauteur moyenne des bandes en fonction de la fréquence, pour les encres cyan, magenta, jaune et noire, au temps d’exposition aux UV minimal et au niveau de goutte 3. (b) Hauteur maximale des bandes en fonction de la fréquence, pour les encres cyan, magenta, jaune et noire, au temps d’exposition aux UV minimal et au niveau de goutte 3. Le trait rouge correspond aux hauteurs demandées tandis que les points correspondent aux hauteurs mesurées.....	157
Figure B.1 24 – (a) Hauteur moyenne des bandes en fonction de la fréquence, pour l’encre cyan au niveau de goutte 3. (b) Hauteur maximale des bandes en fonction de la fréquence, pour l’encre cyan au niveau de goutte 3. Les temps d’exposition aux UV varient.....	158
Figure B.1 25 – (a) Hauteur moyenne et (b) hauteur maximale des bandes en fonction de la fréquence, pour l’encre cyan au temps d’exposition aux UV minimal. La taille des gouttes utilisées varie.....	158
Figure B.1 26 – (a) Hauteur moyenne et (b) hauteur maximale des bandes en fonction de la fréquence, pour l’encre cyan au temps d’exposition aux UV minimal, pour les deux directions d’impression. ....	159
Figure B.2 1 – Exemple de mire utilisée pour le calcul de la fonction de transfert de modulation optique. ....	164
Figure B.2 2 – Allures comparées des FTM et FTC, dans les cas respectifs d’une mire sinusoïdale et d’une mire rectangulaire. [103].....	166
Figure B.2 3 – Procédé d’impression. Le système prend en entrée une image numérique, qu’il convertit en un imprimé. ....	167
Figure B.2 4 – Rétroaction.....	168

Figure B.2 5 – Fréquences d'étude. Les fréquences sont données par cycles (ou paires) par pouce. Une paire correspond à une alternance blanc / noir. L'orientation des bandes correspond à la direction d'impression principale.....	170
Figure B.2 6 – Hauteurs $H_{max}$ et $H_{min}$ en entrée du système. ....	171
Figure B.2 7 – Aspect des matrices géantes. Chaque patch correspond à une fréquence et un couple de hauteurs donnés. Ici, le niveau de goutte est à 1.....	172
Figure B.2 8 – Calcul de différents paramètres sur Mountains Map 6.2™.....	173
Figure B.2 9 – Aspect des courbes. Le signal rectangulaire en pointillés est adressé en entrée du système. Le profil réponse est donné en rouge au niveau de gouttes 1, en bleu au niveau de gouttes 3 et en vert au niveau de gouttes 5. La hauteur demandée est telle que $H_{max} - H_{min} = 44.7$ et la fréquence est fixée à 15 cycles / pouce. Les profils ont été tracés sur une longueur de 8 mm. ....	174
Figure B.2 10 – Hauteurs mesurées dans le cas du couple de hauteurs n°4 (tel que $H_{max} - H_{min} = 44.7 \mu\text{m}$ ).....	175
Figure B.2 11 – Evolution du gain $H0$ , de l'ordre $n$ et de la fréquence de coupure $\nu 0$ pour les 9 couples de hauteurs implémentées. En rouge, au niveau de gouttes 1, en bleu, au niveau de gouttes 3 et en vert, au niveau de gouttes 5. Les valeurs des trois paramètres dans le cas des hauteurs n°2 a été supprimée pour que les graphes soient lisibles. ....	176
Figure B.2 12 – Diagrammes de Bode des FTMH de l'imprimante. Les fréquences sont données en abscisses en cycles / pouce et on a tracé $20 \times \log(FTMH\nu)$ en ordonnées. Les points signalent les valeurs de FTMH mesurées, et les lignes tracées en pointillées sont les modèles déduits. En rouge, niveau de gouttes 1, en bleu, 3, et en vert, 5. ....	177
Figure B.2 13 – Diagrammes de Bode des FTMH de l'imprimante. Les fréquences sont données en abscisses en cycles / pouce et on a tracé $20 \times \log(FTMH\nu)$ en ordonnées. Les points signalent les valeurs de FTMH mesurées, et les lignes tracées en pointillées sont les modèles déduits. En rouge, FTMH au niveau de gouttes 1 ; en noir, FTMH compensées.....	179
Figure B.2 14 – Hauteurs mesurées dans le cas du couple de hauteurs n°4 (tel que $H_{max} - H_{min} = 44.7 \mu\text{m}$ ).....	180
Figure B.2 15 – Aspect de patches de fréquences spatiales différentes. ....	182

Figure B.3 1 – Piliers décrits par [33]. L'arrangement des piliers de verre est de type hexagonal, selon un maillage plus ou moins serré selon le taux de couverture de la surface.....	186
Figure B.3 2 – Motifs implémentés. Chaque carré noir correspond à un pixel, c'est-à-dire à un pilier idéal de 56 $\mu\text{m}$ de côté. Les motifs forment donc soit des piliers de 56 $\mu\text{m}$ de côté, soit des piliers de 112 $\mu\text{m}$ de côté (2 par 2 pixels), soit des formes hybrides (carrés incomplets ou décalés, croix).....	187
Figure B.3 3 – Directions de mesure. La flèche rouge signale la direction d'impression des patches.....	190
Figure B.3 4 – Brillant spéculaire à 60° des imprimés en fonction de la hauteur des piliers demandée, pour les 12 configurations implémentées. ....	191
Figure B.3 5 – Brillant spéculaire à 60° des imprimés en fonction de la hauteur de piliers demandée, pour les trois configurations E, G et I. Deux points supplémentaires à 15 et 30 $\mu\text{m}$ ont été ajoutés.....	191
Figure B.3 6 – Points expérimentaux et modèle pour les deux configurations G (en vert) et I (en bleu). Ces courbes peuvent être utilisées comme des abaques : pour une valeur de brillant désirée, la courbe donne la hauteur des piliers à implémenter. ....	192
Figure B.3 7 – Brillant spéculaire à 60° des imprimés en fonction de la hauteur de piliers demandée, pour la configuration E, aux trois niveaux de gouttes 1, 3 et 5. ....	193
Figure B.3 8 – Brillant spéculaire à 60° des imprimés en fonction du temps d'exposition aux UV, pour la configuration G, pour des piliers de hauteur demandée 80 $\mu\text{m}$ . ....	193
Figure B.3 9 – Hauteur maximale $S_z$ tracée en fonction de la hauteur $h$ demandée. ....	198
Figure B.3 10 – Hauteur maximale $S_z$ tracée en fonction du brillant spéculaire à 60° pour les 12 configurations imprimées à la hauteur $h = 50 \mu\text{m}$ . ....	199
Figure B.3 11 – Asymétrie $S_{sk}$ tracée en fonction du brillant spéculaire à 60°.....	199
Figure B.3 12 – Aplatissement $S_{ku}$ tracée en fonction du brillant spéculaire à 60°. ....	200
Figure B.3 13 – Rugosité quadratique $S_q$ tracée en fonction du brillant spéculaire à 60°.....	201
Figure B.3 14 – Rugosité quadratique $S_q$ tracée en fonction du brillant spéculaire à 60° pour les 12 configurations imprimées au milieu de la gamme ( $h = 50 \mu\text{m}$ ).....	201
Figure B.3 15 – Rugosité quadratique $S_q$ tracée en fonction du brillant spéculaire à 60° pour la seule configuration I, pour 6 hauteurs implémentées. En pointillés, on a tracé la fonction modèle issue des mesures.....	202

Figure B.3 16 – Brillant spéculaire à 60° des configurations E, G et I en fonction de la position de mesure du glossmètre sur l'échantillon, pour des piliers de 80 µm. ....	205
Figure B.3 17 – (a) Lumière diffusée par la surface I imprimée à la hauteur 10 µm, pour 4 angles d'illumination (0°, 20°, 40° et 60°). (b) Coupes transversales à $\theta = 0^\circ$ , en X (courbe bleue) et en Y (courbe jaune).....	206
Figure B.3 18 – (a) Lumière diffusée par la surface I imprimée à la hauteur 80 µm, pour 4 angles d'illumination (0°, 20°, 40° et 60°). (b) Coupes transversales à $\theta = 0^\circ$ , en X (courbe bleue) et en Y (courbe jaune).....	207
Figure B.3 19 – (a) Lumière diffusée par la surface G imprimée à la hauteur 80 µm, pour 4 angles d'illumination (0°, 20°, 40° et 60°). (b) Coupes transversales à $\theta = 0^\circ$ , en X (courbe bleue) et en Y (courbe jaune).....	207
Figure B.3 20 – Corrélation entre la hauteur des piliers et le brillant spéculaire. A gauche, les mesures. A droite, la représentation graphique et le modèle associé. ....	208
Figure B.3 21 – Les 8 échantillons utilisés pour l'expérience psycho-visuelle.....	209
Figure B.3 22 – Moyenne reçue au test psycho-visuel en fonction du brillant spéculaire à 60° mesuré.....	210
Figure B.3 23 – (a) Sparkle et (b) graininess. Image : documentation de BYK™. ....	212
Figure B.3 24 – Protocole de Ferrero <i>et al.</i> La figure présente également les angles impliqués dans le calcul du sparkle. Ici des particules réfléchissantes sont incluses dans un substrat. Seule la particule 1 crée une réflexion visible par le détecteur. [117].....	214
Figure B.3 25 – Notre protocole. La figure présente les angles impliqués dans le calcul du sparkle, tels qu'ils sont définis dans [117]. Les micro-facettes réfléchissantes sont figurées à la surface de l'échantillon. ....	216
Figure B.3 26 – Courbes représentant le pourcentage de surface « blanche » en fonction de l'angle de rotation de la platine pour un imprimé sans piliers à 80 µm et les configurations E, G et I.....	218
Figure B.3 27 – Courbes représentant le pourcentage de surface « blanche » en fonction de l'angle de rotation de la platine pour les configurations G, G aléatoire, I et I aléatoire. ....	220
Figure B.3 28 – Courbes représentant le pourcentage de surface « blanche » en fonction de l'angle de rotation de la platine pour les configurations E à 50 µm, 80 µm, 100 µm, et aux doubles hauteurs.....	222

Figure B.3 29 – Courbes représentant le pourcentage de surface « blanche » en fonction de l'angle de rotation de la platine pour les configurations E aux trois temps d'exposition aux UV. ....	222
Figure B.3 30 – Courbes représentant le pourcentage de surface « blanche » en fonction de l'angle de rotation de la platine pour les configurations I au niveau de gouttes 1 ou aux trois niveaux de gouttes superposés. ....	224
Figure B.3 31 – Courbes représentant le pourcentage de surface « blanche » en fonction de l'angle de rotation de la platine pour toutes les stratégies testées. ....	225
Figure B.3 32 – Points expérimentaux et courbe modèle pour la configuration I. ....	226
Figure B.3 33 – Brillant des imprimés, à 60°, en fonction de la hauteur demandée des piliers, pour les configurations E, G, I et pour les trois encres (cyan, blanc et noir). ....	227
Figure B.4 1 – Mire XpoGrey™. Image : squadra.fr. ....	231
Figure B.4 2 – Courbe d'étalonnage obtenue. Les mesures effectuées sur la charte sont indiquées en gris ; la courbe modèle qui en est déduite est tracée en rouge. On affiche le gloss en fonction de la clarté. ....	232
Figure B.4 3 – Ecart à la réflectance calculés entre la stratégie 1 et le cyan simple (courbe bleue) et entre la stratégie 4 et le cyan simple (courbe noire). ....	235
Figure B.4 4 – Topographies réelles, d'un millimètre de côté, mises à la même échelle en Z (70 µm maximum). (a) Echantillons à piliers I cyan monochromatique. (b) Echantillon imprimé selon la stratégie 1, et (c) échantillon imprimé selon la stratégie 4. ....	235
Figure B.4 5 – Brillant spéculaire à 60° en fonction de la hauteur des piliers de la sous-couche blanche. ....	238
Figure B.4 6 – Couche couleur et couche rugueuse, à deux grossissements (a) et (b). La couche couleur est formée à 50% d'encre cyan, à 25% d'encre magenta et à 25% d'encre jaune. ....	239
Figure B.4 7 – Exemple de dépôt des gouttes, (a) cas à une encre et (b) cas à deux encres. Selon le pourcentage d'encre déposée, la rugosité est plus ou moins modifiée. Plus la rugosité baisse, et plus le brillant spéculaire augmente. ....	239
Figure B.4 8 – Nuancier, imprimé 6 fois : sur une sous-couche blanche plane, puis sur 5 sous-couches blanches à piliers à 25 µm, 50 µm, 65 µm, 80 µm et 100 µm de hauteur. ....	240
Figure B.4 9 – Brillant spéculaire à 60° (en Gloss Units) des 24 patches du nuancier, pour 6 hauteurs de piliers. ....	240

Figure B.4 10 – $\Delta E^*$ des 24 patches du nuancier, calculés entre la charte à 0 $\mu\text{m}$ et chacune des chartes à piliers (25 $\mu\text{m}$ , 50 $\mu\text{m}$ , 65 $\mu\text{m}$ , 80 $\mu\text{m}$ et 100 $\mu\text{m}$ ).	242
Figure B.4 11 – $\Delta E^*$ des patches 13, 14 et 15 du nuancier, respectivement bleu, vert et rouge, calculés entre la charte à 0 $\mu\text{m}$ et chacune des chartes à piliers (25 $\mu\text{m}$ , 50 $\mu\text{m}$ , 65 $\mu\text{m}$ , 80 $\mu\text{m}$ et 100 $\mu\text{m}$ ).	242
Figure B.4 12 – $\Delta E^*$ des patches 16, 17 et 18 du nuancier, respectivement jaune, magenta et cyan, calculés entre la charte à 0 $\mu\text{m}$ et chacune des chartes à piliers (25 $\mu\text{m}$ , 50 $\mu\text{m}$ , 65 $\mu\text{m}$ , 80 $\mu\text{m}$ et 100 $\mu\text{m}$ ).	243
Figure B.4 13 – Evolution de la clarté $L^*$ en fonction de la hauteur des piliers de la sous-couche blanche pour (a) les patches jaunes et (b) les patches cyan.	244
Figure B.4 14 – Evolution de la saturation $Cf = a * 2 + b * 2$ en fonction de la hauteur des piliers de la sous-couche blanche pour (a) les patches jaunes et (b) les patches cyan.	244
Figure B.4 15 – Procédé couleur utilisé en impression. (a) Le système soustractif CMJN. (b) Zoom sur un exemple de trame utilisée pour reproduire certaines couleurs. Images : wikipedia.fr.	246
Figure B.4 16 – Exemple de gamuts représentés dans le diagramme de chromaticité $xy$ . L'œil humain voit plus de couleurs que ce qu'une imprimante est capable de produire. Image : typocentre.fr.	246
Figure B.4 17 – Protocoles mis en place pour l'étude de l'influence de la couleur sur les aspects mats. La hauteur des piliers de la sous-couche est fixée à 80 $\mu\text{m}$ . (a) La couverture d'encre varie. (b), (c) et (d) La couverture d'encre est fixée à 100%, et les pourcentages relatifs en encres primaires varient.	247
Figure B.4 18 – Chartre CMJN utilisée. Les pourcentages d'encre varient de 10 à 100%.	248
Figure B.4 19 – Chartes utilisées pour l'étude des mélanges à deux encres. La couverture en encre est fixe à 100% ; ce sont les pourcentages respectifs d'encres colorées qui varient.	248
Figure B.4 20 – 30 patches colorés utilisés pour l'étude des mélanges à deux encres. La couverture en encre est fixe à 100% ; ce sont les pourcentages respectifs d'encres colorées qui varient. Ici sur les patches de gauche, le pourcentage en encre cyan est faible (10 %), il augmente peu à peu sur les patches de droite.	249
Figure B.4 21 – Chartre cyan sur sous-couche blanche à piliers (80 $\mu\text{m}$ ) vue au microscope. La barre d'échelle correspond à 200 $\mu\text{m}$ . Les piliers sont nettement visibles sous le microscope.	250

Figure B.4 22 – Brillant des quatre chartes sans piliers en fonction des pourcentages d'encre déposés.....	251
Figure B.4 23 – Brillant spéculaire à 60° des quatre chartes sur piliers en fonction des pourcentages d'encre déposés. ....	252
Figure B.4 24 – Charte cyan-jaune sur sous-couche blanche à piliers (80 µm) vue au microscope électronique. La barre d'échelle correspond à 500 µm. ....	252
Figure B.4 25 – Brillant spéculaire à 60° de la charte Cyan – Jaune imprimée sur une sous-couche blanche à piliers à 80 µm ; points mesurés et modèle empirique déduit. Les pourcentages en encre cyan décroissent tandis que les pourcentages en encre jaune augmentent, comme indiqué sur l'échelle de l'axe des abscisses. ....	253
Figure B.4 26 – Charte test présentant des mélanges à deux encres Cyan – Jaune, Cyan – Magenta et Magenta – Jaune. ....	255
Figure B.4 27 – Résultats du test à deux encres. Le brillant spéculaire à 60° donné par les équations de la Table B.4 8 est tracé en fonction du brillant spéculaire à 60° mesuré et corrigé en clarté. ....	255
Figure B.4 28 – Représentation des points mesurés dans un espace à trois dimensions formé par le brillant spéculaire à 60°, le pourcentage d'encre cyan et le pourcentage d'encre magenta. Le pourcentage d'encre jaune se déduit des deux précédents. ....	256
Figure B.4 29 – Points mesurés et surface modèle dans un espace à trois dimensions formé par le brillant spéculaire à 60°, le pourcentage d'encre cyan et le pourcentage d'encre magenta. Le pourcentage d'encre jaune se déduit des deux précédents. ....	257
Figure B.4 30 – Configuration I ; brillant spéculaire à 60° en fonction de la hauteur des piliers implémentée. ....	260
Figure B.4 31 – Gamuts. (a) Représentation du gamut sur fond lisse (forme grise) et du gamut sur micro-structure à piliers (forme jaune). (b) La même chose, projetée dans le diagramme de chromaticité xy à L * = 50. ....	262
Figure B.4 32 – Workflow de l'apparence. ....	263
Figure C.1 1 – Exemples de reproductions pour investigations tactiles grand public. (a) Cas d'une mosaïque romaine, Casa do Infante, Porto. Image : M. Page, C2RMF, 2017. (b) Reproduction de <i>La Jeune Fille à la Perle</i> , Vermeer, effectuée par Canon™ et Océ™. Image : Canon™. (c) Image issue de l'exposition « Peintures du lointain » du musée du Quai Branly, Paris. Image : Océ™. ....	271

- Figure C.1 2 – Exemple de reproduction pour lecture tactile par un public malvoyant. Le dessin est simplifié et on ne voit aucun effet de couleur ni de brillant : ce bas-relief est prévu pour une lecture tactile. (a) Fra Angelico, *Annonciation*, 1437, fresque, couvent de San Marco, Florence. Image : wikipedia.fr. (b) Reproduction tactile, couvent de San Marco, Florence. Image : M. Page, C2RMF, 2018. ....271
- Figure C.1 3 – Un autre exemple, là aussi conçu pour une lecture par des malvoyants. (a) Le Caravage, *Madeleine repentante*, 1593-1594, huile sur toile, FC 357, Galerie Doria-Pamphilj, Rome. Image : wikipedia.fr. (b) Reproduction tactile, présentée à l'exposition consacrée au Caravage à Rome en 2017. Image : www.abc.es.....272
- Figure C.1 4 – Exemples de reproductions à double visée. (a) Ce bas-relief des Offices qui représente *La Naissance de Vénus* de Botticelli est affiché comme destiné aux malvoyants mais il paraît bien trop détaillé pour être utile. Dans les salles, il est systématiquement touché par le public. Image : M. Page, C2RMF, 2018. (b) Panneau de présentation de la première bicyclette française au Musée d'Art et d'Industrie de Saint-Etienne. Cet affichage est à double utilité : la couche couleur donne des explications au grand public, et la surcouche en plastique présente un dessin en relief et de l'écriture Braille. Image : M. Page, C2RMF, 2017. ....272
- Figure C.1 5 – Exemple de bibliothèque de matériaux. Ici des échantillons de porcelaines avec différents revêtements, mats et brillants en (a) et colorés en (b). Porcelaine de Degussa, Musée de la Céramique de Sacavém, Portugal. Exposition au Musée ethnographique de Lisbonne. Images : M. Page, C2RMF, 2017. ....273
- Figure C.1 6 – Exemple de restitution par impression 2D couleurs. A gauche, le tapis dans son état avant restauration. A droite, le tapis après restitution : la lacune imprimée reste légèrement visible, conformément à la déontologie de la restauration. Image : L. Metatla [128]. ....275
- Figure C.1 7 – Exemple de restitution par impression 3D peinte et patinée par le restaurateur Matia Mercante. Image : fr.ubergizmo.com.....275
- Figure C.1 8 – Exemple de restitution par impression 3D sur du mobilier. (a) Comblement 3D, peint en (b). (c) Vue du cadre sous UV et sous lumière visible. Les comblements sont clairement lisibles sous UV. Images : fr.ubergizmo.com et formlabs.com/it.....276
- Figure C.1 9 – Deux exemples de relief incrusté en peinture. (a) Détail du manteau de Saint Paul, *Couronnement de la Vierge*, polyptique, huile sur bois, 1415, Andrea di Bartolo et Giorgio di Andrea, exposé à la Pinacothèque Brera de Milan. (b) Détail (Saint-Pierre et

- Saint-Dominique) du *trptyque de Saint Dominique*, Carlo Crivelli, 1482-1483, tempera sur bois, exposé à la Pinacothèque Brera de Milan. Images : M. Page, C2RMF, 2018. 277
- Figure C.1 10 – Un exemple de texture : (a) Pierre tombale d’une femme et (b) détail, II<sup>ème</sup> siècle après J.C, Palmyre, Syrie, collection du Fitzwilliam Museum, Cambridge. Images : M. Page, C2RMF, 2017. ....277
- Figure C.1 11 – Exemples de textures sur haut-relief. (a) Antoine Bourdelle, *Portrait de femme*, marbre, collection du Musée Bourdelle, Paris. (b) Antoine Bourdelle, *Sappho*, détail de la jupe, bronze, collection du Musée Bourdelle, Paris. Images : M. Page, C2RMF, 2017. ....277
- Figure C.1 12 – Exemples de bas-reliefs. (a) Stèle funéraire du chef chambellan Ibi, Egypte, XII-XIII<sup>ème</sup> dynasties, 1994-1680 av. J-C, Florence, musée archéologique. (b) Gisant de Maria Vilalobos, détail, XIV<sup>ème</sup> siècle, cathédrale de Lisbonne. (c) Objet en ivoire sculpté, XIV-XV<sup>ème</sup> siècle, conservé au Bargello de Florence. Images : M. Page, C2RMF, 2018. ....278
- Figure C.1 13 – Exemples de décors en 2.5D, Palais de Pena, XIX<sup>ème</sup> siècle, Sintra. (a) Élément de décor intérieur en plâtre peint. (b) Élément de décor extérieur en céramique glaçurée (*azulejos*). Images : M. Page, C2RMF, 2017. ....278
- Figure C.1 14 – Exemples de restauration. (a) Restauration ancienne. Camée en calcédoine, période hellénistique (323-30 av. J-C). La partie supérieure, en or, est une restauration effectuée au XVI<sup>ème</sup> siècle par Benvenuto Cellini. Musée archéologique de Florence. (b) Restauration moderne. Coupe en bronze, en provenance de Populonia (Livourne), VII-VI<sup>ème</sup> siècle av. J-C. Musée archéologique de Florence. Images : M. Page, C2RMF, 2018. ....281
- Figure C.1 15 – Exemples de restaurations modernes. (a) Statue antique. Les fragments originaux ont été intégrés dans un buste en résine pour créer une reconstitution cohérente et compréhensible. Partie du fronton d’un temple de Diane, probablement Dionysos, II<sup>ème</sup> siècle av. J-C, musée archéologique, Florence. (b) Bas-relief funéraire en marbre, trouvé à La Figuetta, près de Pise. La partie originale en marbre se distingue des comblements en argile, plus clairs. IV-III<sup>ème</sup> siècle av. J-C, musée archéologique, Florence. (c) Décors en céramique, originaux à droite et reconstitution plus sombre à gauche. Cuisine du Palais Pitti, Florence. Images : M. Page, C2RMF, 2018. ....282
- Figure C.1 16 – Spectre infrarouge et identification des bandes de transmission effectuée sur l’échantillon d’encre blanche. La transmission (en %) est tracée en fonction du nombre

d'onde (en $\text{cm}^{-1}$ ). Spectre effectuée sous spectromètre infrarouge à transformée de Fourier. Etude réalisée par Lucile Brunel-Duverger, Université de Cergy-Pontoise / C2RMF.....	284
Figure C.1 17 – Paramètres d'apparence d'un objet réel. Ici Donatello, <i>La Nativité</i> , XVI <sup>ème</sup> siècle, bas-relief polychromé, 770X755cm, Musée du Louvre.....	287
Figure C.1 18 – Impression en relief. Plusieurs couches d'encre sont superposées pour former l'objet. Le corps de l'imprimé forme le relief global de l'objet, sa forme. Au-dessus, une couche d'encre blanche est modulée pour donner la sensation de brillant. Lui est ajoutée une dernière couche qui contient l'information couleur. ....	287
Figure C.1 19 – Rugosité quadratique $Sq$ (en $\mu\text{m}$ ) en fonction du brillant spéculaire mesuré à $60^\circ$ (en Gloss Units).....	288
Figure C.1 20 – Facteur d'aplatissement $Sku$ (sans unité) en fonction du brillant spéculaire mesuré à $60^\circ$ (en Gloss Units).....	289
Figure C.1 21 – Facteur d'asymétrie $Ssk$ (sans unité) en fonction du brillant spéculaire mesuré à $60^\circ$ (en Gloss Units).....	289
Figure C.1 22 – Longueur d'autocorrélation $Sal$ (en mm) en fonction du brillant spéculaire mesuré à $60^\circ$ (en Gloss Units).....	290
Figure C.1 23 – Analyse par composantes principales. Les points bleus représentent les différentes stratégies d'impression, données en fonction de la hauteur des piliers implémentés.....	291
Figure C.1 24 – Analyse par composantes principales. Les points bleus représentent les différentes stratégies d'impression, données en fonction de la hauteur des piliers implémentés.....	291
Figure C.2 1 – (a) Moulure originale en plâtre. (b) Résultat de la numérisation 3D de l'objet. ....	296
Figure C.2 2 – Fichiers utilisés pour l'impression, imprimés en encre blanche. (a) Fichier contenant l'information sur la forme : plus l'image est sombre, plus le relief est élevé. (b) Fichier contenant l'information sur le brillant : motif régulier I. ....	297
Figure C.2 3 – Impression en relief. L'ensemble est réalisé uniquement en encre blanche, ce qui nous évite la couche couleur finale. Le relief est formé d'encre suivant l'image (a) de la Figure C.2 2, et le brillant selon l'image (b) de la même figure.....	297
Figure C.2 4 – De gauche à droite : imprimé mat à piliers, objet original, et imprimé sans piliers.....	298

- Figure C.2 5 – Imprimé mat placé sur l’imprimé plus brillant. Sous cet éclairage, même si cela n’est pas idéalement rendu par la photographie, on voit la différence entre les reflets brillants de l’imprimé normal, signalés par la flèche verte, qui sont absent de l’imprimé à micro-structure, signalé par la flèche bleue. ....298
- Figure C.2 6 – Exemples de boutons anciens. (a) « Cachets boutons », peut-être un ancêtre du sceau, décor géométrique. En haut : terre cuite, site de Tepe Giyan, Iran, 4<sup>ème</sup> millénaire av. J.-C. En bas : pierre, site de Tepe Sialk, Iran, 4<sup>ème</sup> millénaire av. J.-C. Musée du Louvre. (b) Boutons ornementaux en argile, site de Kavakli, Grèce, 330-300 av. J.-C. Musée du Louvre. Images : les8petites8mains.blogspot.com.....300
- Figure C.2 7 – Trois exemples médiévaux. (a) Paysan en tunique boutonnée sur la poitrine et chausses et poulaines. Portail de la cathédrale de Trogir, œuvre de Radovan, XIII<sup>ème</sup> siècle. Image : M. Page, C2RMF, 2018. (b) Cotte et surcot ouvert orné de boutons décoratifs. Jeanne de Bourbon, portail des Célestins, 1365-1370, Musée du Louvre. Image : wikiwand.fr. (c) Célèbre pourpoint boutonné de Charles de Blois, aux 32 pièces assemblées et fermées par 32 boutons. Milieu du XIV<sup>ème</sup> siècle, soie, lampas et fils d’or. Collection du musée des tissus de Lyon. Image : les8petites8mains.blogspot.com.....300
- Figure C.2 8 – Le bouton facilite l’habillement. Cycle des Héros et des Héroïnes (détail), v. 1420, peinture à fresque, Château de la Manta, Italie. Image : les8petites8mains.blogspot.com.....301
- Figure C.2 9 – Trois élégants, trois époques, trois boutonnages. (a) Anonyme, *Saint-Mégrin*, v. 1575-1578, aquarelle, gouache et or à la coquille sur vélin, MI1097, musée du Louvre. Image : M. Beck-Coppola, Musée du Louvre. (b) *Galerie des modes et costumes français*, 1778, pl.52, d’après un dessin de P.-T. Leclerc, *Jeune élégant en habit moucheté avec une veste blanche garnie de bandes d’indienne*. Bibliothèque du musée des Arts décoratifs. Image : mfa.org. (c) G. Boldini, Robert de Montesquiou, 1897, huile sur toile, RF 1977 56, musée d’Orsay, Paris. Image : Hervé Lawandowski, RMN-Grand Palais. ....302
- Figure C.2 10 – Le bouton dans le vêtement féminin : l’émancipation. (a) Suffragettes portant des vêtements d’inspiration masculine, 1911. Image : alternativelibertaire.org. (b) Ensemble Corrège, années 60. ....302
- Figure C.2 11 – (a) Bouton à trous et (b) bouton à queue. ....303
- Figure C.2 12 – Boutons d’étude issus des réserves non inventoriées du musée Galliera. Les boutons 3 et 10 sont en double. ....304

Figure C.2 13 – (a) Reconstruction 3D du bouton n°6 effectuée avec le scanner 3D. L’image est incomplète car la reconstruction est impossible à terminer. Environ 45 min de scan. (b) Scan 3D du même bouton n°6 effectué avec la station de microtopographie. 5 heures de mesure. ....	305
Figure C.2 14 – Premiers tests de textures sur les boutons 1 (en haut), 2 (au milieu) et 6 (en bas). Images : A. Maigret et M. Page, C2RMF, 2018. ....	308
Figure C.2 15 – (a) Géographie de l’Elam. Image : wikimedia.com. (b) Bandage d’une roue de char composé de six éléments, bronze, XX <sup>ème</sup> siècle av. J.-C., dynastie des Sukkalmah, époque d’Attahushu (fouilles R. de Mequenem), Sb 6829, département des Antiquités orientales, musée du Louvre. Image : M. Page, C2RMF, 2018. ....	310
Figure C.2 16 – Exemples d’objets en provenance du site de Suse, datés du II <sup>ème</sup> millénaire av. J.-C. (a) Sceau cylindre, dynastie des Sukkalmah, Suse V, époque néo-sumérienne, hématite, Sb 6225 (fouilles R. de Mequenem). Image : M. Page, C2RMF, 2018. (b) Figurine dite du « dieu à la main d’or », bronze et or, début du II <sup>ème</sup> millénaire av. J.C, Sb 2823. (c) Statuette de femme, Suse V, époque néo-sumérienne, dynastie de Shimashki et des Sukkalmah, tell de l’Acropole (fouilles J. de Morgan), coquille, Sb 2746. Images : Oi-Cheong Lee, Musée du Louvre. (d) Collier, Suse V, or et agate, Sb 17749. Image : Raphaël Chipault, Musée du Louvre, 2006. ....	310
Figure C.2 17 – Exemples de roues pleines. (a) Char à haut tablier et quatre roues pleines, terre cuite, Suse, époque médio-élamite, 2340-1500 av. J.-C., Sb 3068. Département des Antiquités orientales, musée du Louvre. Image : M. Page, C2RMF, 2018. (b) Char à roues pleines, détail de l’étendard d’Ur, marqueterie de calcaire, lapis-lazuli, coquillages et bitume, cimetière royal d’Ur, 2500 av. J.-C., 121201, British Museum, Londres. Image : en.wikipedia.org. ....	312
Figure C.2 18 – Le bandage de roue en bronze. Les zones fragiles et lacunaires ont été entourées en rouge. Image : A. Chauvet, C2RMF. ....	312
Figure C.2 19 – Aspects de surface. On distingue les coloris gris, beige, vert et bleu. Image : A. Chauvet, C2RMF. ....	313
Figure C.2 20 – (a) Vue de dessus des zones 4-5-6 et 4-7-8. (b) Vue de côté des mêmes zones. Les parties manquantes sont signalées par les zones hachurées. ....	314
Figure C.2 21 – (a) Scanner à lumière structurée utilisé sur le fragment n°5. (b) Modèle 3D résultant. ....	314

Figure C.2 22 – Microtopographies du bronze : images fausses couleurs et simulations photographiques correspondantes. Exemples tirés du fragment n°6 : (a) zone bleutée et (b) zone sédimentée. ....	316
Figure C.2 23 – Prises de vue sous microscope optique de différentes zones de bronze. (a) et (b) sur le fragment n°6 (barre d'échelle 1000 $\mu\text{m}$ ) et (c) sur le fragment décapé n°9 (barre d'échelle 500 $\mu\text{m}$ ). ....	316
Figure C.2 24 – Protocole suivi pour la prise de vue en studio photo. Une charte couleur est utilisée pour la calibration. Image : A. Maigret, C2RMF, 2018. ....	317
Figure C.2 25 – Prise de vue effectuée en studio photo. Fragment n°5 (environ 7 cm de long) Image : A. Maigret, C2RMF, 2018. ....	318
Figure C.2 26 – Prises de vue effectuées en studio photo. (a) et (b) Fragment n°6 recto et verso. (c) et (d) Fragment n°9 recto et verso. Les deux objets font environ 5 cm de longueur. Images : A. Maigret, C2RMF, 2018. ....	318
Figure C.2 27 – Fragments 5 et 6 assemblés, et création du comblement. Image : C. Hochart, C2RMF, 2018. ....	319
Figure C.2 28 – Fragments 4, 5, 6 et le comblement. Image : C. Hochart, C2RMF, 2018. ...	319
Figure C.2 29 – Comblement numérique. En (a), fichier obtenu après calcul géométrique et plaquage d'une texture. En (b), cartographie des hauteurs correspondantes. ....	320
Figure C.2 30 – (a) Fichier erroné établi après un calcul numérique qui ne correspondait pas à l'hypothèse des conservateurs et restaurateurs de l'œuvre. (b) Fichier établi après correction. ....	320
Figure C.2 31 – Piliers retenus. (a) Configuration I (un carré noir fait 112 $\mu\text{m}$ de côté). (b) Ces mêmes piliers, vus en coupe. (c) Les piliers répartis sur l'ensemble du comblement. ...	321
Figure C.2 32 – Solution 1 : extraction de couleurs $L^*$ , $a^*$ et $b^*$ simples. Mais laquelle choisir ? Image de gauche : A. Maigret, C2RMF, 2018. ....	322
Figure C.2 33 – Solution 2 : extraction de textures colorées. Les textures sont extraites des photographies prises sur les fragments n°5, 6 ou 9. ....	322
Figure C.2 34 – Solution 4 : extraction et combinaison de motifs colorés élémentaires. Les textures sont extraites des photographies prises sur les fragments n°5, 6 ou 9. ....	323
Figure C.2 35 – Premier essai d'impression. Toutes les encres sont utilisées pour créer un relief simple, sans microstructure affectant le brillant. Image : A. Maigret, C2RMF, 2018. ....	323

Figure C.2 36 – Deuxième essai d'impression. Toutes les encres sont utilisées pour créer la forme, puis du blanc est ajouté, et enfin une couche couleur issue des photographies calibrées. Image : A. Maigret, C2RMF, 2018.....	324
Figure C.2 37 – Troisième essai d'impression. Cette fois-ci la couche intermédiaire blanche est texturée en micro-piliers. On compte 369 couches d'encres mêlées, puis 80 µm de piliers blancs et une couche couleur. Image : A. Maigret, C2RMF, 2018.....	324
Figure C.2 38 – L'imprimé et l'objet. Image : A. Maigret, C2RMF, 2018.....	325
Figure C.2 39 – (a) Sceau rond en plomb présentant les saints Pierre et Paul et (b) son contre-sceau avec le nom du pape. Bulle du pape Alexandre IV (1254-1261), H 1402-28. Images : Archives départementales de L'Yonne.....	327
Figure C.2 40 – (a) Sceau en navette en cire verte présentant Jeanne, reine de France et de Navarre, comtesse de Champagne, entourée des écus de France et de Navarre et (b) contre-sceau aux armes royales et de Champagne. 1286, H 674-11. Images : Archives départementales de L'Yonne.....	327
Figure C.2 41 – (a) Sceau plaqué. Charte du roi Henri I <sup>er</sup> , 1035, H 32-1. (b) Sceau appendu. Charte de Philippe-Auguste, confirmative d'une sentence arbitrale réglant les droits de l'abbaye Sainte-Colombe de Sens sur la forêt de Nailly, 1204, H 85-6. Images : Archives départementales de L'Yonne.....	328
Figure C.2 42 – Matrices de sceaux et sceau en cire sélectionnés pour l'étude. (a) Matrice de sceau n°115. (b) Matrice de sceau n°152. (c) Matrice de sceau n°124. (d) Sceau de Guillaume de Hainaut (que l'on notera ici G. de H.).....	329
Figure C.2 43 – (a) Scan 3D réalisé sur la matrice de sceau n°124. (b) Carte des hauteurs tirée directement de ce scan et utilisée pour l'impression d'une matrice. (c) Carte des hauteurs déduites par inversion de (b) et utilisée pour l'impression d'un sceau.....	331
Figure C.2 44 – Imprimés réalisés. (a) Matrice de sceau. (b) Matrice de sceau mate. (c) Sceau aspect cire rouge. (d) Sceau.....	331
Figure C.2 45 – (a) Microtopographie réalisée sur l'oiseau de la matrice n°124. (b) Cartographie des hauteurs déduites du fichier scanné. (c) Imprimé en creux réalisé. (d) Imprimé en plein.....	332
Figure C.2 46 – Vues sous microscope des imprimés « aspect cire rouge brillant » et « mat blanc », tous deux en plein. La barre d'échelle figure 1 mm. ....	332
Figure C.2 47 – Scan 3D, cartographies des hauteurs et imprimés réalisés (en plein et en creux) pour la matrice de sceau n°115.....	333

Figure C.2 48 – (a) Scan 3D réalisé sur le sceau en cire verte G. de H. (b) Microtopographie réalisée sur un détail de ce même sceau.....	333
Figure C.2 49 – Haut-relief du linteau du portail nord de la cathédrale Saint-Lazare d’Autun, Eve dans le jardin du Paradis, moulage, 1125-1135. Image : M. Page, C2RMF, 2018.	335
Figure C.2 50 – Essai « à la main ». (a) Photographie de mauvaise qualité d’une salamandre de la Cité de l’Architecture. (b) Scan du dessin effectué d’après la photographie. (c) Image numérique du dessin dont les formes sont remplies par des niveaux de gris représentant les hauteurs à imprimer. Images : M. Page, C2RMF, 2018. ....	336
Figure C.2 51 – A gauche : salamandre imprimée en 205 couches, sans effet de matité. A droite, structure blanche mate. Images : A. Maigret, C2RMF, 2018. ....	336

## Liste des annexes

Annexe A.1 1 Apparence et histoire de l'art.....	361
Annexe A.1 2 Vocabulaire de la sculpture .....	383
Annexe A.2 1 Métrologie du glossmètre .....	387
Annexe A.2 2 Métrologie de la station de microtopographie .....	391
Annexe B.2 1 Fonctions de transfert d'échantillons à faibles hauteurs.....	397
Annexe B.2 2 Directions d'impression.....	399
Annexe B.3 1 Gamme de brillant accessible .....	401
Annexe B.4 1 Mélanges à deux encres.....	403
Annexe C.2 1 Fiche d'identification de l'œuvre .....	407



# Introduction générale

## 1. Contexte industriel : l'impression couleur

Le contexte général dans lequel se place cette thèse est celui de l'imprimerie. Lorsqu'au XV<sup>ème</sup> siècle Gutenberg invente la presse à bras et les caractères mobiles, l'imprimerie passe du statut d'artisanat à celui de domaine industriel. Les ateliers d'imprimeurs florissent dans toute l'Europe (voir Figure 1) et les textes, livres, affiches ou images en noir et blanc se répandent sur l'ensemble des territoires.

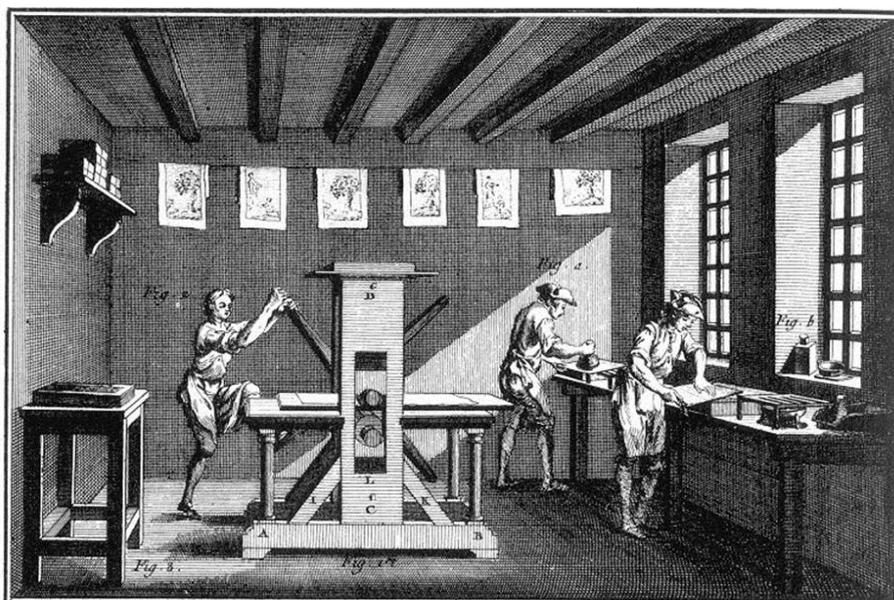


Figure 1 – Atelier d'imprimeurs : gravure tirée de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert, Tome 8. Image : users.libero.it.

L'impression en noir et blanc se pratique de manière relativement aisée à l'aide des caractères mobiles, disposés pour former des textes, ou à l'aide de planches gravées pour les illustrations, encrées en noir, pressées contre un support papier, reproductibles en grand nombre. Il n'en va pas de même pour l'impression couleur, qui nécessite l'apposition successive de plusieurs planches ou plusieurs jeux de caractères gravés. Ainsi la Bible de Gutenberg, premier volume imprimé avec des caractères mobiles, dont la Figure 2 donne une image tirée de l'exemplaire conservé à la Bibliothèque nationale française, présente deux couleurs : le texte est en noir, avec certaines parties en exergue en rouge. Les enluminures qui décorent les bordures du texte ont été rajoutées manuellement après l'impression, mais les parties en noir et en rouge ont bien été imprimées, ce qui signifie que chacune des pages est passée deux fois sous la presse, pour les caractères encrés en noir et pour les caractères encrés en rouge, les feuillets devant être minutieusement placés afin que le texte ne se superpose pas.



Figure 2 – La Bible de Gutenberg, exemplaire sur vélin, vol. 3, 1455, BNF, Réserve des livres rares. Image : A. Komenda, BNF, gallica.bnf.fr.

Pour les images gravées, le même principe est appliqué afin de former un imprimé en couleurs : il faut créer autant de planches gravées que de couleurs, les encrer et les superposer finement. La Figure 3 en donne un exemple tiré de la gravure japonaise, mais le même principe est appliqué en Occident.



Figure 3 – Procédé de création d'une gravure nishiki-e par apposition successive de planches en bois colorées. Pour créer l'image complète, 12 planches séparées sont nécessaires. Image : [Process of woodblock printing, Nishinomiya & Hasegawa, baxleystamps.com](http://Process of woodblock printing, Nishinomiya & Hasegawa, baxleystamps.com).

L'impression couleurs passe de l'artisanat à l'industrie lorsqu'au XVIII<sup>ème</sup> siècle, Jacob Christoph Le Blon découvre le procédé trichromique. En exploitant la synthèse dite « soustractive » des couleurs, ce procédé permet l'impression d'une image qui présente une large palette de couleurs en superposant seulement trois plaques gravées et encrées en cyan, magenta et jaune (voir exemple Figure 4). Ce procédé est largement repris et connaît un immense succès. Tous les procédés d'impression moderne, l'héliogravure, l'offset, puis le jet d'encre, utilisent ce principe.



Figure 4 – Exemple de chromolithographie trichrome : l'image colorée finale est en bas à droite. Les autres planches sont encrées respectivement en jaune, magenta et cyan. Image : Louis Prang, Archivs of American Art.

L'impression jet d'encre, qui apparait avec le numérique à la fin du XX<sup>ème</sup> siècle, utilise le procédé trichromique (quadrichromique lorsqu'un canal d'encre noire est ajouté aux encres cyan, magenta et jaune) pour produire des images colorées d'un très bon rendu. Les couleurs accessibles sont aujourd'hui nombreuses, et les images finales sont de bonne qualité. L'impression couleur est donc arrivée aujourd'hui à un certain aboutissement et cherche un nouveau souffle. Pour monter en gamme, il ne faut plus envisager la couleur seule, mais bien l'apparence globale des objets.

## 2. Vers la reproduction de l'apparence

Les attributs de l'apparence sont définis par la Commission Internationale de l'Eclairage comme la couleur, la texture visuelle, la forme, le relief, la taille, la transparence, l'opacité, le brillant, etc, d'un objet. L'impression couleur traditionnelle permet la gestion fine de la

couleur et de la texture visuelle, mais les autres attributs lui restent inaccessibles. En revanche, l'apparition de procédés d'impression additifs (2.5D ou 3D), par dépôt de couches colorées successives, rend envisageables la conception d'un volume, la gestion de la transparence par création de couches de vernis sans support, et la gestion du brillant. Reproduire un objet en relief à l'apparence maîtrisée devient possible.

La création de surfaces brillantes à très brillantes au moyen d'une imprimante relief à fait l'objet d'un doctorat mené entre 2012 et 2015. Ce travail a montré comment le brillant des imprimés pouvait être augmenté en jouant sur les paramètres d'impression ou l'ajout de vernis sur les passes colorées (Figure 5). La gamme des non-brillants, ou mats, n'avait pas été explorée. Or si l'on envisage de reproduire des matériaux réels, c'est le mat qui va primer. Pour gagner en qualité et reproduire une plus large gamme de matériaux, il faut être capable de créer des surfaces mates.

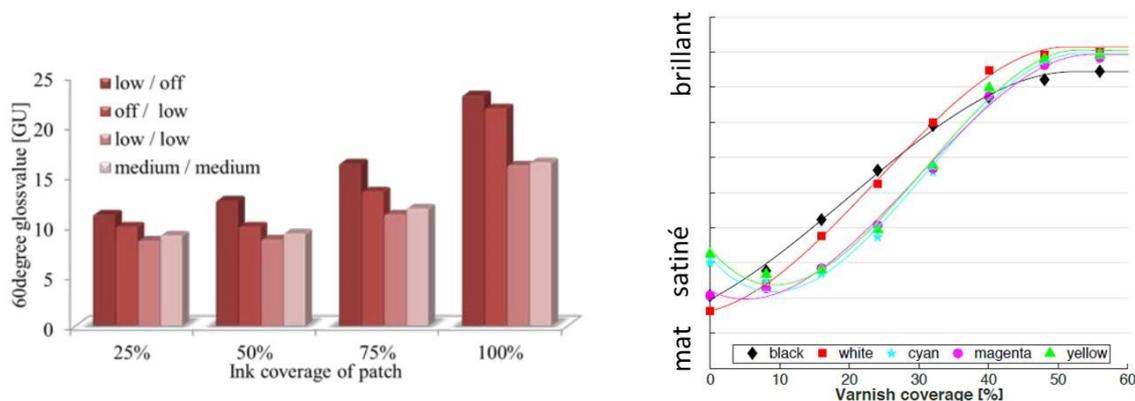


Figure 5 – Monter en brillant avec l'imprimante 2.5D, en jouant sur les temps de séchage des encres (à gauche) ou sur l'ajout de vernis (à droite). Images : T. Baar, Optimisation of print quality with multi-channel printing, 2015.

### 3. Problématique

C'est donc le rendu brillant qui fait la différence de qualité entre plusieurs procédés, et en particulier, la capacité à produire des surfaces mates. Le présent manuscrit tente de répondre au problème suivant :

#### Comment générer des surfaces mates avec un seul matériau (brillant) : l'encre ?

Le texte est découpé selon les parties suivantes :

##### Partie A : Apparence des matériaux mats.

**Chapitre A.1 : Production d'objets mats.** Ce chapitre s'intéresse au mat d'un point de vue esthétique, puis d'un point de vue industriel. Pourquoi chercher à faire des objets mats, et comment les produire industriellement ou artisanalement ?

**Chapitre A.2 : Définir, mesurer et reproduire les aspects de surface mats.**

Le brillant (et donc le mat) est un attribut de l'apparence et se définit d'un

point de vue physique et perceptuel. En particulier, le lien entre rugosité et brillant est exploré.

**Partie B :** Optimisation des performances d'un système d'impression en relief : faire du mat.

**Chapitre B.1 : L'impression 2.5D.** Présentation du système d'impression et des paramètres mis en jeu. Influence de ces paramètres sur la rugosité et la texture.

**Chapitre B.2 : Relief des imprimés.** Mise en place d'un protocole rigoureux de mesure du relief et des performances du système.

**Chapitre B.3 : Brillant des imprimés.** Description des stratégies mises en œuvre pour diminuer les effets de brillant et de scintillement des encres.

**Chapitre B.4 : Couleur des imprimés mats.** Problématique, stratégies et construction d'un espace de prédiction du brillant des mélanges colorés.

**Partie C :** Reproduction de matériaux mats réels.

**Chapitre C.1 : Réflexions sur la création d'objets mats pour le patrimoine.**

**Chapitre C.2 : Applications.** Les résultats obtenus sont appliqués à différents cas d'études tirés du domaine de la conservation – restauration du patrimoine. En particulier, le statut de l'imprimé réalisé et sa possible intégration dans un processus de restauration sont abordés.

L'accent sera mis sur la fiabilité et la précision métrologique des mesures, résultats et instruments utilisés. Les parties sont indépendantes.



## PARTIE A

# Apparence des matériaux mats



## Partie A – Apparence des matériaux mats

La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) définit l'apparence d'un objet par quatre concepts normalisés : couleur, texture, brillant et transparence. Chacun de ces termes transcrit un type de perception, par un observateur humain, des interactions entre la lumière et la matière, sur une interface « objet ». L'objet, de même qu'il ne nous est visible que parce qu'il est éclairé, possède une apparence qui est fonction de ses propriétés intrinsèques. Un seul paramètre n'est pas suffisant pour reconnaître avec fiabilité un matériau, même si en pratique, la texture renseigne déjà beaucoup l'observateur ; c'est la combinaison de plusieurs attributs qui compte.

L'aspect de surface d'un objet est sa caractéristique première, celle qui vient frapper l'œil de l'observateur, de manière positive ou négative : le rendu d'un objet est ce qui nous renseigne sur sa qualité et dans un cadre mercantile, nous décide ou non à l'acheter. En particulier, couleur et brillant sont les deux attributs majeurs qui déterminent la qualité d'un produit.

Dans ce travail, nous nous concentrons particulièrement sur les aspects brillants et mats des surfaces manufacturées. Le premier chapitre de cette Partie A, dédiée aux paramètres d'apparence des surfaces, est consacré au contexte socio-culturel de l'étude : pourquoi chercher à produire des objets mats ? Nous verrons aussi comment les industries classiques font pour fabriquer des objets mats. Dans le second chapitre, la définition scientifique des aspects mats / brillants sera donnée ; on verra aussi quels sont les moyens de mesure de ces paramètres et les problématiques qui leur sont associées.



## Chapitre A.1. Production d'objets mats

Pourquoi chercher à produire des objets mats ? On sait que les aspects de surface influent sur l'observateur ou le consommateur, en positif ou en négatif. En particulier, un rendu de surface brillant ou mat peut être culturellement lié à l'idée de qualité d'un produit.

Nous l'avons dit en introduction, notre objectif est d'arriver à produire des surfaces mates. Pour justifier cette démarche, nous proposons dans ce premier chapitre une mise en contexte de notre étude scientifique. Le cadre culturel sera présenté, ainsi qu'un essai d'esthétique du brillant et du mat. L'objectif de ce chapitre est donc de placer l'étude dans un certain contexte sociologique – celui du monde occidental du XXI<sup>ème</sup> siècle – et dans un contexte industriel spécifique et encore assez nouveau – celui de la fabrication additive de matériaux.

# 1. Esthétique du mat : le brillant en négatif

L'esthétique est la science du beau. S'il apparaît presque évident que l'on peut construire une esthétique du brillant, propriété valorisée, qu'en est-il pour le mat ? Peut-il être reconnu comme un attribut visuel porteur de sens et de qualité ? Pour dessiner une esthétique du mat, nous allons d'abord ériger celle du brillant ; en la déconstruisant, nous établirons celle de son antagoniste : le mat.

## 1.1 Attrait pour l'éclat

Les objets brillants sont appréciés par la plupart des cultures, passées ou contemporaines. Nous explorons ici quelques pistes d'explications à cette fascination pour les matières et objets brillants.

### 1.1.1 Symbolique de la lumière

Les astres – le soleil, la lune, les étoiles – sont à la base de nombreuses croyances. De l'opposition primitive jour/nuit, lumineux/sombre, brillant/mat, découle nombre de symboles et de pensées. Les divinités solaires, qui représentent la vie, la lumière et la chaleur, priment sur les autres dieux des religions polythéistes : le soleil est positif et puissant, car sans soleil, pas de vie. Pour les Egyptiens de l'Antiquité, le dieu majeur est Râ, le dieu-soleil ; chez les Grecs, Apollon Phoebus (de Φοῖβος, « le brillant » ou « le radieux » en grec ancien) personnifie le soleil ; Mithra dans la Rome antique est un dieu associé au soleil ; Huitzilopochtli chez les Aztèques est dieu du soleil et maître du monde. Quand ce n'est pas la religion qui érige le soleil en principe fondateur, c'est le pouvoir politique qui s'attribue ce symbole : Louis XIV est ainsi le Roi-Soleil. La famille impériale japonaise dit également descendre de la déesse du soleil Amaterasu [1].

La lumière est donc primitivement considérée comme la représentation de la vie et la preuve de la puissance des dieux. On retrouve toujours aujourd'hui des traces de ces mythes anciens. Les anglophones par exemple ont conservé pour nommer les jours de la semaine une étymologie qui remonte aux astres : « Sunday », le jour du soleil, et « Monday », le jour de la lune.

Le tout premier texte de l'Ancien Testament commence ainsi : « Au commencement, Dieu avait créé le ciel et la terre. Or, la terre n'était que solitude et chaos ; des ténèbres couvraient la face de l'abîme, et le souffle de Dieu planait sur la face des eaux. Dieu dit : « Que la lumière soit ! » Et la lumière fut. Dieu considéra que la lumière était bonne, et il établit une distinction entre la lumière et les ténèbres. Dieu appela la lumière Jour, et les ténèbres, il les appela Nuit. Il fut soir, il fut matin, – un jour. » [2]. Pour la majeure partie de l'humanité, c'est la lumière qui représente le bon, le grand et le sacré ; l'ombre est au contraire associée à la nuit, à la peur, au danger et à la mort. Les trois grands monothéismes sont fondés sur cette antinomie. Le christianisme reprendra largement le symbole du soleil et de la lumière, créant une synthèse entre le monothéisme hébreu et la mythologie romaine ; synthèse qui trouve une de ses expressions dans le *Cantique des Créatures* de Saint François d'Assise :

« Sois loué, Seigneur, pour toutes tes créatures,  
spécialement pour messire le Frère Soleil,  
Qui apporte le jour et à travers qui Tu nous donnes la lumière. » [3]

La citation est intéressante à deux niveaux : tout d'abord, le soleil est présenté comme créé par Dieu, bienfaisant et positif puisqu'il amène le jour ; à un second niveau, sa lumière éclaire les âmes. La lumière signifie l'intelligence, la pensée, la réflexion. Eclairer, c'est apporter l'intelligence, la compréhension ; réfléchir, c'est penser, comprendre [4].

Les objets brillants réfléchissent la lumière ; ils présentent un éclat, parfois vif, parfois changeant, parfois scintillant. Par là-même, ils sont valorisés car ils reflètent une partie de la symbolique de la lumière.

### 1.1.2 Lexicologie du brillant

Voici la définition des termes « briller » et « brillant » données par Le Nouveau Petit Robert de la Langue française, dans son édition de 2008 [5] :

- **Briller** [brije], v. intr. – 1564, de l'italien « brillare ».
  1. Emettre ou réfléchir et répandre une lumière vive. Par ext. Avoir de l'éclat, être resplendissant.
  2. FIG. Se manifester avec éclat, se distinguer par quelque qualité brillante.
  
- **Brillant, ante** [brijã, ât], adj – 1564, de briller.
  1. Qui brille. Cheveux brillants. « Deux yeux froids et brillants comme l'acier », Daudet. Des yeux brillants de fièvre. Une rivière « brillante des constellations de la nuit », Chateaubriand.
  2. FIG. Qui sort du commun, s'impose à la vue, à l'imagination par sa qualité. Faire de brillantes études, une brillante carrière, un brillant mariage. Un brillant parti. Cette découverte aura un brillant avenir. Une brillante entreprise. Un esprit brillant. Une brillante improvisation. Conversation brillante. Un brillant causeur. Un brillant élève.
  3. AVEC UNE NEGATION. Pas brillant. Le résultat n'est pas brillant, est médiocre. Ses affaires ne sont guère brillantes, guère prospères.

Les synonymes de l'adjectif brillant donnés Table A.1 1 sont à ce titre assez significatifs [6]. Au brillant sont associés uniquement des qualificatifs joyeux et vivants, lumineux et positifs. Au mat, son antonyme, la tristesse et la morosité. Par extension, le brillant est donc tenu pour une valeur connotée positivement, tandis que le mat n'est pas du tout apprécié. Mais attention, ceci n'est pas vrai dans toutes les civilisations. Les Japonais par exemple apprécient fortement le sombre et prônent toute une esthétique de la non-lumière. Nous y reviendrons dans la suite.

Synonymes	Antonymes
<p>1. Brillant</p> <p>Chatoyant, coruscant, éblouissant, éclatant, étincelant, flamboyant, fulgurant, luisant, lumineux, lustré, miroitant, phosphorescent, radieux, rayonnant, resplendissant, rutilant, satiné, scintillant.</p>	<p>Assombri, éteint, fané, mat, sombre, ténébreux, terne, terni.</p>
<p>3. Brillant</p> <p>Beau, bon, éblouissant, étourdissant, magnifique, remarquable, réussi, somptueux, splendide ; distingué ; florissant ; fleuri, pétillant, rayonnant, recherché, spirituel, vif ; captivant, intéressant ; doué, remarquable.</p>	<p>Borné, effacé, éteint, humble, médiocre, modeste, morne, pas reluisant, pas glorieux, pauvre, pitoyable, quelconque, simple, sombre, sot, triste, vilain.</p>

Table A.1 1 – Synonymes et antonymes du mot « brillant ».

Par extension, les matières brillantes vont transposer une partie des qualités de l'attribut « brillant » sur leur réalité physique. L'or, qui ressemble au soleil, devient un métal magique : « Les premiers hommes qui ont ramassé une pépite d'or dans le lit d'un ruisseau ont dû penser que c'était un morceau de soleil tombé sur terre. Beaucoup de cultures, pensant que l'or était lié au soleil et au feu, en firent le symbole de leurs dieux les plus puissants » [7]. Par analogie, l'or devient protecteur, précieux, symbole d'immortalité [8] ; il est ainsi utilisé pour les masques mortuaires, dans les tombes, sur les momies, pour assurer le passage dans l'au-delà et la vie après la mort.

Le mot « brillant », attesté en français depuis le XVI<sup>ème</sup> siècle, vient de l'italien *brillare*, lui-même dérivé du mot *beryllus*, du grec βήρυλλος - *bêrullōs*, qui désigne le béryl, une pierre fine brillante, vert-jaune. C'est donc l'éclat de la pierre naturelle qui donne sa valeur au substantif. Le terme « mat » est lui attesté depuis le XII<sup>ème</sup> siècle dans la langue française. Le mot provient probablement du latin *mattus* (chez Pétrone, « stupide, qui a le vin triste », utilisé chez Isidore de Séville au VI<sup>ème</sup> siècle au sens d'« humide », et qui a donné en italien *matto*, « fou »), dérivé de *madere*, « être humide » [9]. L'évolution de l'adjectif est révélatrice d'un changement dans la pensée : utilisé au XII<sup>ème</sup> siècle au seul sens d'« abattu, affligé », puis de « flétri » au XV<sup>ème</sup> siècle, il prend la signification de « terne » au XVII<sup>ème</sup> siècle seulement. Le sens « mat, terne », opposé au « brillant » quand on désigne spécifiquement l'absence de réflexions lumineuses, est donc relativement récent, et a entièrement supplanté l'ancienne signification « triste, abattu ». En revanche, le sens négatif semble avoir perduré.

	Brillant	Mat
Latin	floridus ; nitens ; fulgens ; nitidus ; splendidus.	impolitus (non poli) ; surdus (en parlant d'une couleur) ; decolor (décoloré) ; hebes (terne) ; crassus (épais, lourd, gras, grossier, stupide) ; pallidus, luridus, dilutus, livens (pâle, blafard, livide, maladif) ; intermortuae, subfuscus, obsoletus, obscurus.
Allemand	glänzend (meubles, yeux) ; leuchtend (couleurs) ; glitzernd (plan d'eau) ; brillant (discours, candidat) ; glanzvoll (représentation) ; glorreich (victoire). → leuchten, strahlen, scheinen, funkeln, glänzen.	matt (sans reflet) ; trüb (regard) ; schmutzig (blanc terne) ; blind (miroir) ; angelaufen (métal) ; dunkel (sombre).
Anglais	shiny, polished (luisant) ; glossy (peinture) ; lustrous (soie) ; sparkling, glittering (pierre précieuse, métal) ; bright (yeux) ; brillant, outstanding, dazzling (remarquable).	matt, dull (couleur) ; unpolished (surface).

Table A.1 2 – Vocabulaire du brillant et du mat en latin et dans deux langues indo-européennes germaniques, l'anglais et l'allemand [10, 11, 12].

La lexicologie du brillant et l'étude rapide de ses synonymes, en français, en latin et dans deux langues modernes d'origine germanique, donnée Table A.1 2 nous apprend que les Européens valorisent très nettement les aspects de brillant, tandis qu'à son antonyme *mat* sont associés des qualificatifs dépréciatifs.

### 1.1.3 Le brillant des formes vivantes

Et de fait, le brillant est synonyme de vie : au-delà des astres et de la puissance des dieux, plus près de nous, il y a le brillant des prunelles et des peaux, le lustre du pelage des animaux ou des plumes d'un oiseau (voir Figure A.1 1), l'éclat de la lumière du jour. Dans la nature, les objets brillants sont innombrables et toujours loués positivement : le reflet du soleil sur le givre, les feuilles ou la mer provoquent des impressions agréables dont la reproduction par l'art est un défi autant qu'un exercice de style.

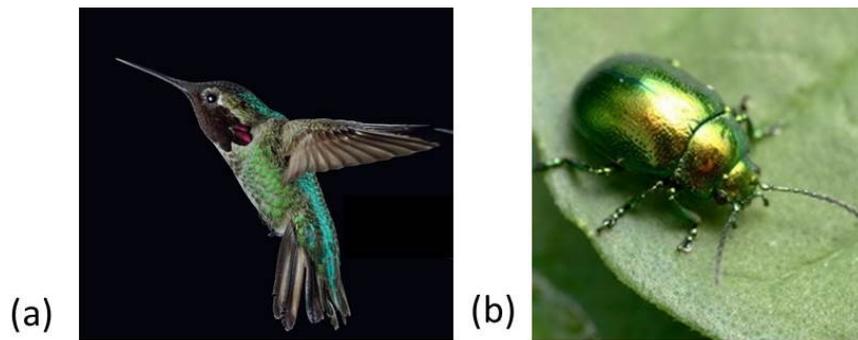


Figure A.1 1 – Eclats brillants naturels. (a) Petit colibri d'Anna. Image : R. Dudley pour le National Geographic. (b) Coléoptère. Image : udec.ru.

On passe de la sphère du symbole à celle du beau : le brillant est ici associé à divers phénomènes agréables, dont la contemplation apaise et ressource. Mais souvent, si les phénomènes lumineux et les animaux chatoyants sont prisés, la nuit et les animaux sombres restent vus défavorablement. Le chat noir est toujours associé à la sorcière dans l'imaginaire collectif...

Les écrivains et les poètes ont rivalisé d'imagination pour décrire les beautés de la nature. Giono, grand peintre de la nature et des hommes, commence ainsi Que ma joie demeure :

« C'était une nuit extraordinaire.

Il y avait eu du vent, il avait cessé, et les étoiles avaient éclaté comme de l'herbe. Elles étaient en touffes avec des racines d'or, épanouies, enfoncées dans les ténèbres et qui soulevaient des mottes luisantes de nuit. [...] Le ciel tremblait comme un ciel de métal. » [13]

La métaphore ciel – champ se double d'un vocabulaire du brillant. La nature est ainsi complètement magnifiée par les étoiles brillantes. Le reflet pupillaire dans les yeux des hommes est également un sujet éternel et romantique. Si l'on peut y lire un signe médical de santé, Hugo y voit plutôt la marque de l'esprit de l'homme [14] :

« Flamme superbe, la volonté visible. L'œil de l'homme est ainsi fait qu'on y aperçoit sa vertu. Notre prunelle dit quelle quantité d'homme il y a en nous. Nous nous affirmons par la lumière qui est sous notre sourcil. Les petites consciences clignent de l'œil, les grandes jettent des éclairs. Si rien ne brille sous la paupière, c'est que rien ne pense dans le cerveau, c'est que rien n'aime dans le cœur. Celui qui aime veut, et celui qui veut éclaire et éclate. La résolution met le feu au regard ; feu admirable qui se compose de la combustion des pensées timides. »

Le reflet renseigne sur l'homme et ses qualités, mais aussi ses défauts, comme chez Giono encore : « A travers les cils on voyait maintenant la lueur de l'œil ; elle était verte et profondément luisante » [13], où le reflet un peu dérangeant qui est décrit est celui des yeux d'une folle. Même chose chez Apollinaire [15] :

« O belle Loreley aux yeux pleins de pierreries  
De quel magicien tiens-tu ta sorcellerie

[...]

Mes yeux ce sont des flammes et non des pierreries  
Jetez jetez aux flammes cette sorcellerie »

Les yeux de la Loreley brillent de mille feux, mais elle est maudite et destinée à mourir. Dans tous les cas, le brillant de la nature ou celui des yeux de l'homme sont vus comme des attributs positifs, de beauté ou de vie intérieure (que celle-ci soit vertueuse ou dérangée). Le brillant reste un attribut positif et vivant.

#### 1.1.4 Rareté et richesse des produits naturels ou manufacturés brillants

Si sur terre les phénomènes brillants sont nombreux, les matériaux inorganiques brillants sont au contraire rares, précieux, et par conséquent chers. Posséder un objet brillant devient donc la preuve d'une certaine réussite sociale : l'éclat des objets est prisé, parce qu'il prouve que celui qui les possède a un niveau de vie élevé. Deux notions sont donc imbriquées : premièrement, le minerai brillant est prisé car il est brillant, et qu'il ressemble au soleil ou aux astres ; il est donc symboliquement intéressant (magique, protecteur, lié aux dieux, etc.). Deuxièmement, le minerai brillant est prisé car il est la marque d'un certain niveau de vie.

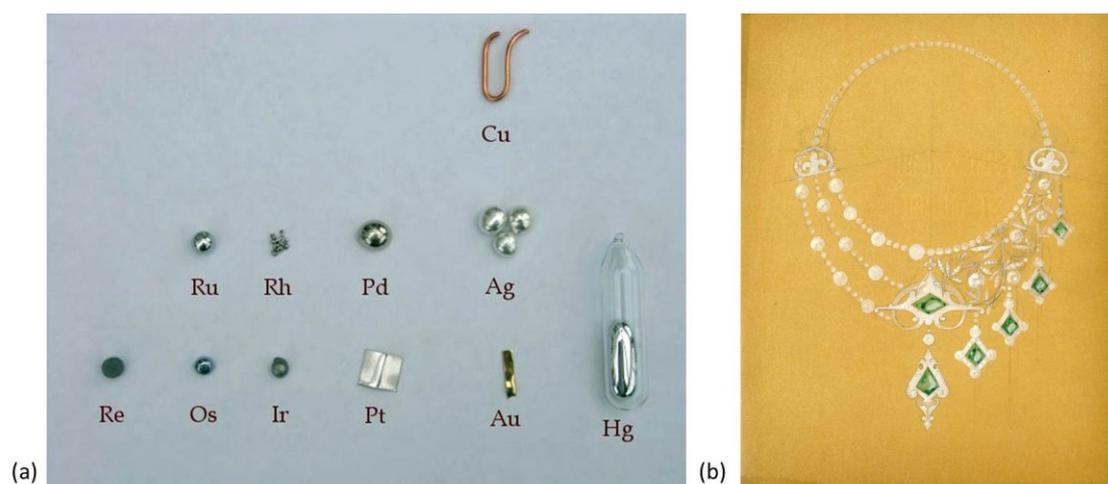


Figure A.1 2 – Métaux brillants et pierres précieuses. (a) Série de métaux précieux et brillants, Image : wikipedia.fr. (b) Collier René Lalique. Image : Lalique.

Les mines de minerais précieux sont relativement rares, et celles de pierres précieuses encore plus. La rareté, la provenance parfois lointaine et la difficulté d'extraction de ce type de produits explique un prix élevé. Les diamants sont extraits « à l'autre bout du monde », puis achetés dans les pays riches (Etats Unis, Moyen Orient, Occident). Posséder de tels objets, en plus d'être un placement financier (en temps de disette, on peut toujours revendre ses dents en or...), correspond à une certaine idée du luxe : couverts en argent, casseroles en cuivre, robinets en – autant d'objets qui prouvent une aisance certaine. « Être né avec une cuillère en argent dans la bouche » : tout est dit !



Figure A.1 3 – Un repas populaire, vaisselle mate, et un repas huppé, vaisselle en argent. Noter la chope en étain, qui imite à bas prix une vaisselle de meilleure qualité. (a) Jacob Jordaens, *Le Mangeur de bouillie*, détail, 1652, huile sur toile, musée des Beaux-Arts de Strasbourg. Image : akg-images.fr. (b) Jean-François de Troy, *Le déjeuner de chasse*, détail, 1737, huile sur toile, R.F. 1990-18, musée du Louvre. Image : H. Lewandowski, RMN Grand Palais.

On comprend aisément que l'attribut brillant se retrouve ainsi culturellement associé à des qualificatifs de richesse et de faste. L'industrie du luxe joue d'ailleurs toujours avec ces symboles, et propose un type de publicité basée sur la juxtaposition d'images brillantes et de produits soyeux et sur leur association indirecte avec la richesse et la rareté.

NOMBRE ATOMIQUE — 5 —																					
SYMBOLE — B —																					
NOM DE L'ÉLÉMENT																					
1																	2				
H																	He				
3	4															5	6	7	8	9	10
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
11	12															13	14	15	16	17	18
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36				
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86				
Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118				
Fr	Ra	Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	De	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo				
LANTHANIDES																					
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71							
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu							
ACTINIDES																					
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103							
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr							

Figure A.1 4 – Classification périodique des éléments. Les métaux brillants sont très nombreux sur terre – ils ont été surlignés selon leur couleur, mais la plupart d'entre eux ne se trouvent pas à l'état simple : ils sont combinés avec d'autres éléments. Le fer est l'élément le plus abondant, ce qui explique son coût bas. Il présente un aspect brillant une fois travaillé. Le nickel comme le zinc ou le cuivre sont moyennement abondants. Le platine, l'argent ou l'or sont beaucoup plus rares et nettement plus brillants.

Les Figure A.1 2, Figure A.1 3 et Figure A.1 4 illustrent le propos en présentant respectivement des métaux précieux et leur emploi dans l'industrie du luxe ; la différence entre la vaisselle populaire mate et la vaisselle de luxe brillante, et la répartition des métaux dans la classification périodique.

### 1.1.5 Une explication « aquatique »

Différentes études récentes se sont penchées sur la question de l'origine de notre attirance pour les objets brillants. Nous avons vu que les objets brillants sont associés à des qualificatifs symboliques de vie et de puissance, puis culturellement, de richesse et de luxe. Pourtant, les très jeunes enfants montrent déjà un goût prononcé pour les objets à reflets brillants. Pourquoi ?

Dans un article daté de 2010, Richard Cross établit un lien entre les reflets brillants des objets et l'aspect d'un paysage aquatique [16] ; dans la suite de son étude, il explique que les jeunes enfants vont jusqu'à lécher les objets brillants, un comportement instinctif qui tendrait à montrer le lien sous-jacent entre brillant et eau [17]. Les enfants âgés de quelques mois léchaient les objets brillants, et jamais les objets ternes : ils les lapaient parfois carrément, comme les chats lapent le lait.

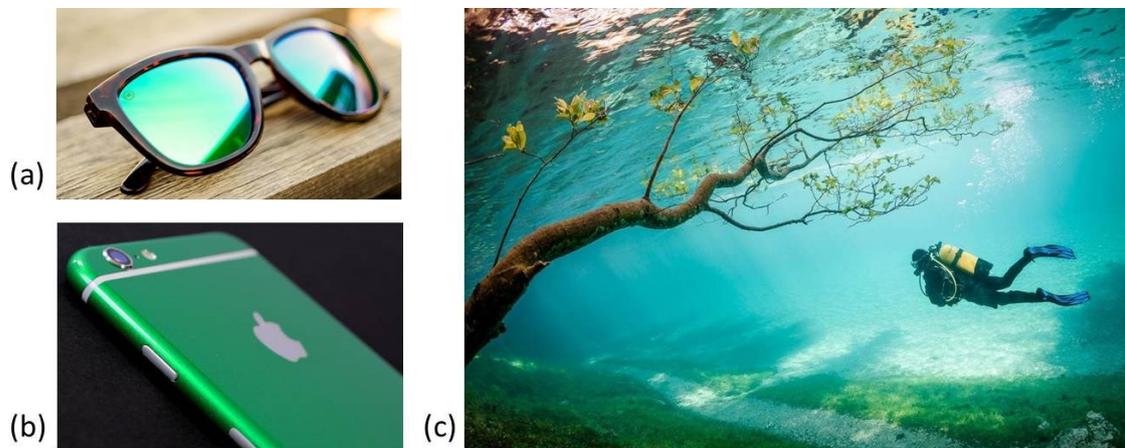


Figure A.1 5 – Brillant et eau. (a) Paire de lunettes de soleil ultra brillantes. Image : Knockaround. (b) Smartphone satiné. Image : Apple. (c) Paysage aquatique du Grüner See, Autriche, Image : Marc Henauer pour le National Geographic.

Une seconde étude, menée par une équipe belge en 2014, a exploré cette voie à travers une série d'expériences tendant à démontrer que l'attraction des hommes pour les objets brillants est causée par le besoin vital en eau plutôt que par un lien culturel associant brillant et luxe [18]. Ainsi, cette attirance serait le résultat d'un processus évolutif : de l'instinct primitif pour l'eau, sans laquelle on ne peut vivre, découlerait notre goût pour les objets aux reflets brillants. Dans un premier temps, l'étude montrait que les enfants préfèrent les rendus papiers brillants aux rendus mats. Cette préférence ne peut pas être culturelle, puisque les enfants sont trop jeunes pour faire un lien entre brillant et richesse. Dans un second temps, les participants adultes devaient noter à l'aveugle la qualité d'une surface. Certains reçurent un papier mat, d'autres un papier brillant. Chaque participant ayant touché une surface brillante l'a mieux notée que les participants ayant reçu une surface mate. Le goût pour le brillant n'est donc pas uniquement visuel, mais aussi tactile, et donc indépendant de critères de beauté conventionnels. Lorsqu'ils touchaient les surfaces brillantes, les participants devaient dire quel paysage ce contact leur suggérerait : ils imaginaient chaque fois des scènes aquatiques. Dans un dernier test, trois groupes de participants adultes ont reçu soit des biscuits seuls, soit

des biscuits et de l'eau, soit rien du tout. Les participants de tous les groupes regardaient les mêmes photographies : quatre sur du papier mat, et quatre sur du papier brillant. Tous ont préféré les photographies brillantes, mais parmi les participants qui avaient mangé des biscuits, ceux qui n'avaient pas reçu d'eau les ont très franchement préférées. Plus nous avons soif, et plus nous aimerions les objets brillants ?

Ainsi, l'attrance humaine pour les objets brillants pourrait être reliée à notre instinct, et notre besoin primaire en eau. Evidemment, l'étude ne prétend pas répondre entièrement à cette question. La connexion entre eau et richesse, qui sous-tendrait le lien brillant-luxe, reste ouverte (Figure A.1 5).

**Remarque :** L'adage dit que les pies sont voleuses, et particulièrement friandes d'objets brillants. Pourtant, d'après une étude britannique, l'oiseau de la Figure A.1 6 serait bien moins attiré par le brillant que ce que l'on croit [19] ! En 64 expériences, Toni Shepard et son équipe ont montré que la réaction des pies en présence d'objets mats ou brillants étaient la même : la méfiance. Peut-être que la mauvaise réputation de l'oiseau tient simplement au fait que sur tous les objets banals qu'elle transporte, seuls les objets brillants attirent l'attention de l'œil humain...



Figure A.1 6 – La pie voleuse des Bijoux de la Castafiore, par Hergé. Image : fr.tintin.com.

#### 1.1.6 Esthétique du brillant

Pour toutes les raisons que nous venons d'évoquer, il est certain que l'on reconnaît aux objets brillants une certaine beauté, qui est à la base de courants artistiques. Les objets brillants, parfois chers et précieux, avec la symbolique de la lumière et de la vie qui leur est associée, sont très appréciés. Il est toutefois difficile de séparer le beau en lui-même de la symbolique du brillant que l'on a développée dans les parties précédentes. Mais on peut dire qu'un objet brillant, cher, précieux et beau peut être distingué d'un objet brillant, cher, précieux et laid.

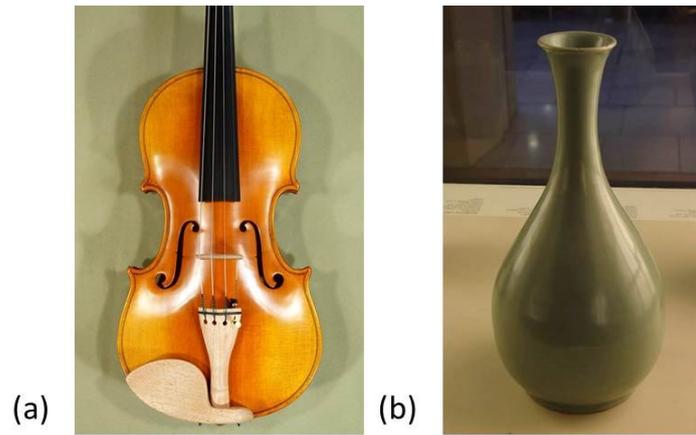


Figure A.1 7 – (a) Violon Nicolas Amati, en acajou verni. Image : [blog.violon.com](http://blog.violon.com). (b) Carafe de vin, grès glaçuré, imitation céladon. Dynastie Goryeo, XIIème siècle, site de Sadang-ri, Corée, C.419-1984, Fitzwilliam Museum, Cambridge. Image : M. Page, C2RMF, 2017.

Les objets brillants sont retravaillés pour briller mieux, c'est-à-dire plus au goût de l'œil, ce qui est illustré Figure A.1 7. Les pierres précieuses sont taillées par les orfèvres pour capter au mieux la lumière et briller de mille feux. Les bois sont polis et vernis pour briller plus vivement. Les marbres sont polis, tout comme les métaux ; le verre est poncé, la céramique est glaçurée. Culturellement (car cela n'est pas valable dans toutes les sociétés), le brillant est largement reconnu comme synonyme de Beau : décoratif, distrayant, plaisant à l'œil, harmonieux.

Il se dégage de certains objets brillants une sérénité et une pureté admirables. La stylisation, le choix de l'artiste de les concevoir dans une matière brillante, polie à cette fin, n'est pas anodin ; les qualités esthétiques d'œuvres semblables à celles représentées Figure A.1 8 découlent en grande partie de leur aspect de surface.

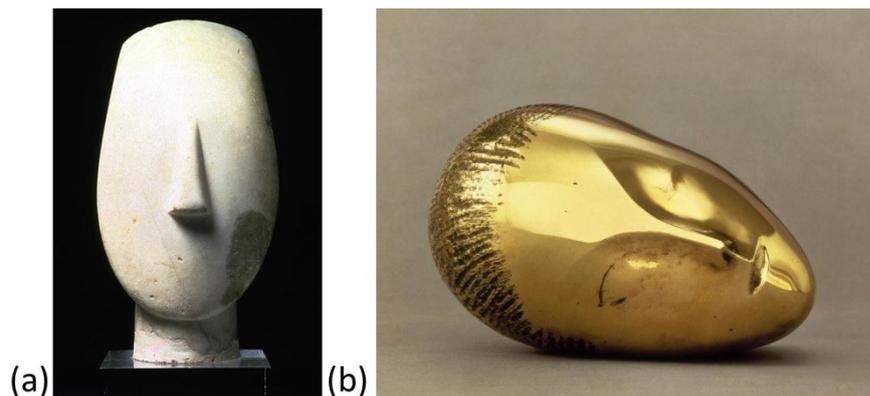


Figure A.1 8 – Deux représentations d'un visage humain stylisé et brillant, à 5000 ans d'écart. Rapprochement fait par [4]. (a) Figure féminine en marbre lisse et brillant, art cycladique ancien II, 3<sup>ème</sup> millénaire av. J.-C., Ma 2709, Musée du Louvre. Image : [franceculture.fr](http://franceculture.fr). (b) Brancusi, *La Muse endormie*, 1910, bronze poli, AM 1374 S, Centre Pompidou. Image : Adam Rzepka, Centre Pompidou, MNAM-CCI, Dist. RMN-GP.

### 1.1.7 Représentation picturale du brillant

La représentation du brillant en peinture a été la spécification majeure de la peinture occidentale, ainsi que l'objet de multiples travaux dans l'histoire de l'art. Nous traitons plus en avant cette problématique dans l'Annexe A.1.1 Il nous suffit de dire ici que les peintres occidentaux, en se focalisant sur l'ombre et la lumière, et sur la représentation mimétique de la réalité, ont été forcés de saisir les aspects de brillant avec pour seuls outils leurs pinceaux.

Dans son ouvrage Lumière, Vision, Peinture, Philippe Lanthony explore plusieurs types de représentations du brillant [20]. Il s'intéresse notamment aux reflets pupillaires, dont nous avons déjà parlé. Ce reflet apporte de la vie aux portraits, et fait montre d'un grand réalisme pictural. Lanthony s'intéresse particulièrement aux autoportraits, et tire de la position des reflets pupillaires des conclusions sur les déformations optiques des peintres. Mais dans le cadre de notre étude, la présence ou non des reflets pupillaires nous intéresse car elle est caractéristique d'une peinture réaliste.

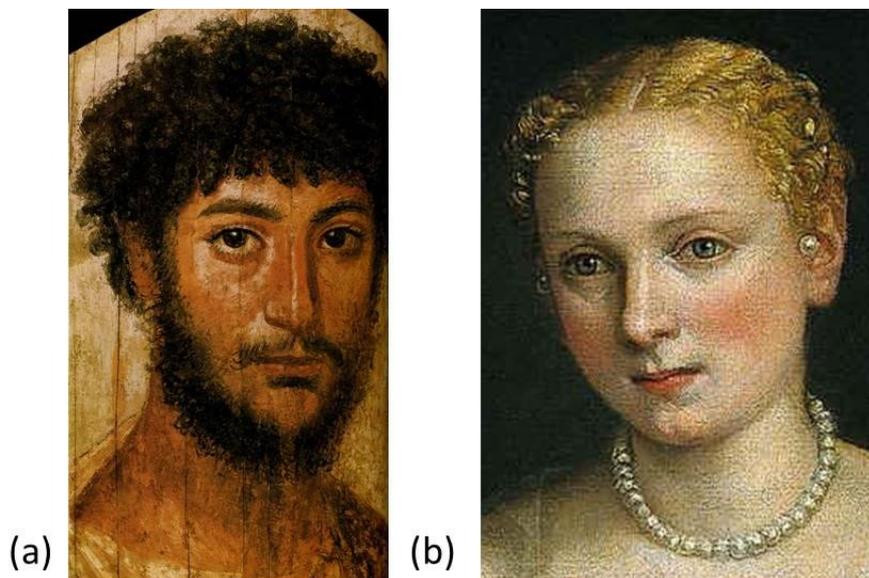


Figure A.1 9 – Reflets pupillaires. (a) Un portrait du Fayoum, I<sup>er</sup>-IV<sup>ème</sup> siècle ap. J.-C., encaustique sur bois. (b) Véronèse, *Portrait d'une Vénitienne, dite La Belle Nani*, vers 1560, huile sur toile, R.F. 2111, musée du Louvre. Image : E. Lessing, Musée du Louvre.

Plus loin, Lanthony explore les questions liées aux reflets du soleil sur l'eau. A nouveau, l'auteur prend la question du point de vue optique : sur un tableau, le reflet du soleil dans l'eau est-il réaliste ? Comment les artistes ont-ils résolu la question de la perspective ? La question « Comment les artistes ont-ils représenté les reflets brillants ? » est tout aussi intéressante. Les solutions proposées sont remarquables, et se distinguent nettement selon les mouvements artistiques. En particulier, les Impressionnistes ont résolu ce problème par la juxtaposition de petites touches qui forment un ensemble, vu de loin, d'un réalisme un peu trouble mais qui satisfait le regard.

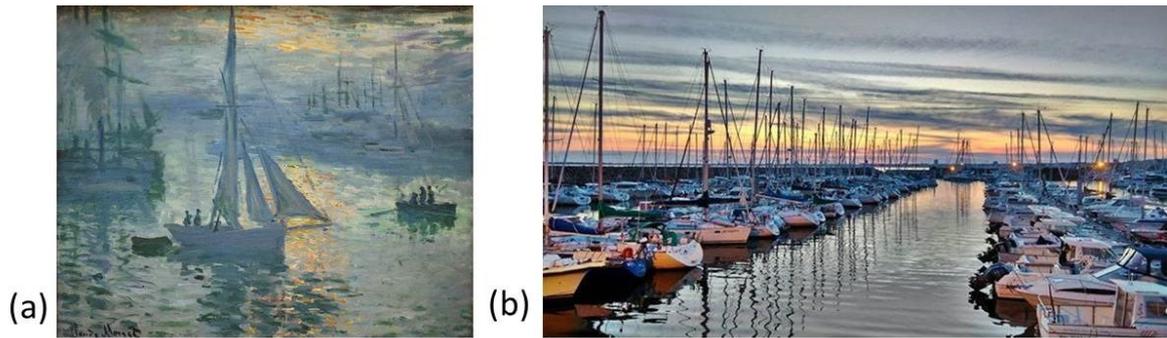


Figure A.1 10 – Reflets aquatiques. (a) Claude Monet, Soleil levant (marine), 1873, huile sur toile. Image : J.P. Getty Museum. (b) Photographie du port de plaisance de Pornichet Image : lavielabaule.fr.

La question de la représentation picturale du brillant est passionnante et s’inscrit dans la grande question de l’illusionnisme en peinture. Nous abordons brièvement cette question dans Annexe A.1.1.

## 1.2 Le retour du mat

Dans la partie précédente, nous avons vu pourquoi les aspects de surface brillants étaient appréciés. Nous allons à présent déconstruire ce que nous avons établi pour comprendre la nouvelle esthétique du mat.

### 1.2.1 Un brillant ostentatoire

Les objets brillants, mis en valeur par l’industrie du luxe ou les nouvelles technologies, sont parfois juste trop brillants. Faire l’étalage de sa richesse par des possessions matérielles n’est pas une marque de simplicité ; si la munificence est une qualité chez le Prince, l’ostentation n’en est pas une chez l’homme « normal ». Le brillant ostentatoire, même s’il est fréquent, n’en est pas moins d’assez mauvais goût (voir Figure A.1 11).

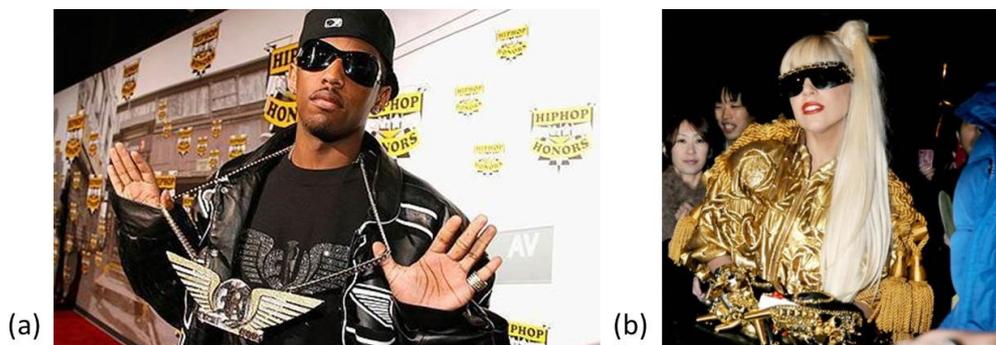


Figure A.1 11 – Deux illustrations du style « bling bling ». (a) Un rappeur américain, image : quora.com. (b) Lady Gaga en 2013, image : plurielles.fr.

Le style *bling-bling* illustre nettement cette tendance au brillant ostentatoire. Outrancière, cette mode met en avant l’argent, et colle à la peau de certains personnages politiques, comme

un reproche... De nombreuses philosophies et éthiques religieuses ont critiqué le goût du luxe et de l'ostentation, en premier lieu desquelles l'épicurisme, le stoïcisme, le bouddhisme ou le protestantisme.

Si dans la plupart des mythes, les objets brillants ont un rôle positif, ils sont aussi parfois vivement critiqués. Chez les Grecs, Atalante qui a décidé de n'épouser que l'homme qui la battra à la course à pied, est séduite par l'éclat de petites pommes en or lancées par son prétendant et perd le défi. Dans la mythologie germanique, l'or du Rhin est l'objet de différentes quêtes et malheurs. Tolkien reprend ses thèmes anciens lorsqu'il crée Gollum, créature fascinée par un anneau d'or maléfique (Figure A.1 12).

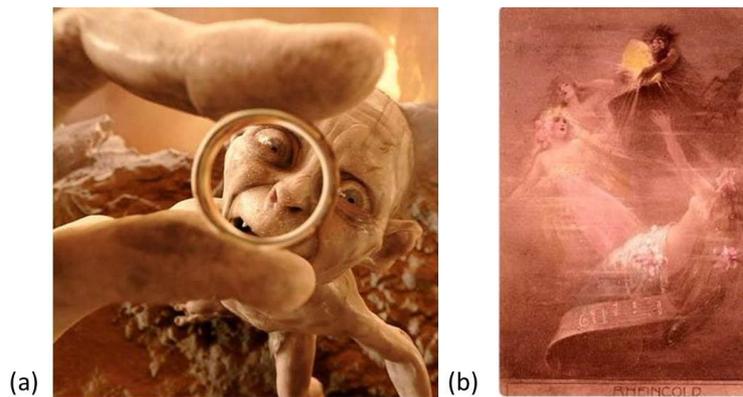


Figure A.1 12 – L'attraction pour le brillant poussée à ses extrêmes pathologiques... (a) Gollum, personnage du Seigneur des Anneaux, dans sa version cinématographique signée Peter Jackson. Image : saganomringen.wikia.com (b) L'Or du Rhin, opéra de Richard Wagner, inspiré d'une légende germanique. Image : wikipedia.fr.

### 1.2.2 Un brillant blafard

Le brillant est également associé à deux attributs qui ne sont pas vraiment positifs : une idée de propreté excessive et un ressenti « métallique ». La propreté brillante, si elle est plaisante à petite dose, peut virer au cauchemar : ce sont les murs froids, blafards des hôpitaux ou l'esthétique scientifique et dérangeante des films de science-fiction. Les fabricants de peinture l'ont bien compris : ils proposent une large gamme de peintures mates ou satinées, dites « chaleureuses », et qu'ils opposent à la peinture brillante, fonctionnelle, lavable, ultra propre, limitée aux cuisines, aux salles de bain et aux environnements médicaux. Puisque la peinture mate ne présente pas de reflets, la couleur semble plus profonde, et la décoration intérieure plus chaleureuse. Le fabricant de peinture Tollens indique ainsi que le mat donne « un aspect plus élégant » aux murs, et une « atmosphère chaleureuse et cosy » illustrée par la Figure A.1 13 [21].

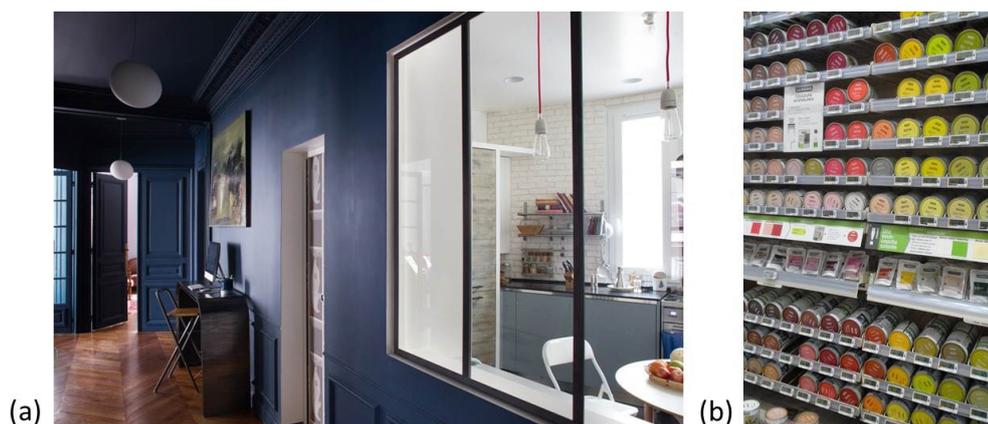


Figure A.1 13 – Peinture mate. (a) Intérieur mat proposé par Tollens. Image : tollens.com. (b) Rayonnages d'un magasin de bricolage. Image : M. Page, C2RMF, 2017.

### 1.2.3 Illisibilité et erreur

L'objet brillant n'a donc pas toujours les faveurs du consommateur, ni de l'esthète. En plus du facteur culturel, on peut ajouter deux défauts des aspects brillant : l'illisibilité et l'erreur. Si les reflets brillants masquent l'information et la véritable fonction d'un objet, alors ils sont néfastes : les verres de lunettes sont recouverts d'une couche d'antireflets pour que le regard ne soit pas masqué, tout comme devraient l'être les vitres qui recouvrent les œuvres d'art fragiles pour que le reflet ne rende pas la peinture impossible à contempler (Figure A.1 14). Nous reviendrons sur cette difficulté dans la fin de ce manuscrit, lorsque nous verrons comment la lecture des sceaux médiévaux peut être facilitée par la création d'une copie mate.

Les reflets brillants peuvent donner une impression défavorable : une peau luisante, un aliment gras, etc. Dans l'industrie alimentaire, le brillant est « à consommer avec modération » : on sélectionne les pommes, les tomates ou les aubergines sur leur brillant, mais ce n'est (heureusement) pas le cas des fromages, viandes ou pains...dans ce dernier cas, brillant signifierait gras et donc malsain.

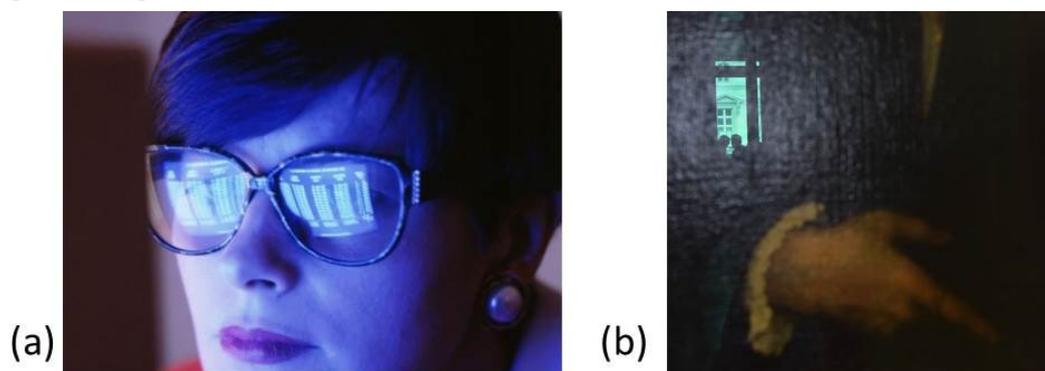


Figure A.1 14 – Exemple de difficultés de lecture de l'information. (a) Reflets sur des lunettes. Image : sciencesetavenir.fr. (b) Reflet d'une fenêtre sur la vitre du *Jeune homme au gant*, Titien, Musée du Louvre. Image : M. Page, C2RMF, 2017.

Notons à ce sujet que les reflets brillants sont à éviter tout particulièrement quand on cherche à se dissimuler : les avions furtifs utilisés par l'armée doivent être visuellement indétectables. Tout reflet brillant est donc proscrit : ces engins militaires sont mats. Ces avions mats sophistiqués sont valorisés par un certain type de consommateurs, qui vont souhaiter en conséquence posséder un véhicule automobile recouvert de peinture mate.

#### 1.2.4 Tout ce qui brille n'est pas or

L'arrivée du plastique à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle a entraîné une surenchère de produits bas de gamme brillants. Fabricables en série, moulées, thermoformées, bon marché, les matières plastiques s'imposent rapidement : environ 10 tonnes de plastiques étaient produites chaque jour de l'année 2015 [22]. Avec le plastique se termine la noblesse du brillant : désormais accessibles à tous et peu chers, les bijoux, paillettes, chaussures, couverts, et autres objets du quotidien se recouvrent tous d'une surface réfléchissante ou scintillante (Figure A.1 15).

Les matières plastiques savent imiter le cuir, la soie (matières polyester), les diamants, le verre, le métal, etc. Comment distinguer le vrai du faux ? Comment savoir si les chaussures du voisin valent 50 ou 500 euros ? Et face à cette surenchère brillante, qu'apprécier à titre esthétique ? Il semble que les valeurs se renversent : le mat devient prisé, par contraste. Sur certains blogs [23], on signale que dans des domaines comme la mode, le mobilier ou le design, les aspects de surface mats sont devenus « tendance » ; ils surfent sur la mode du recyclage et de la récupération.

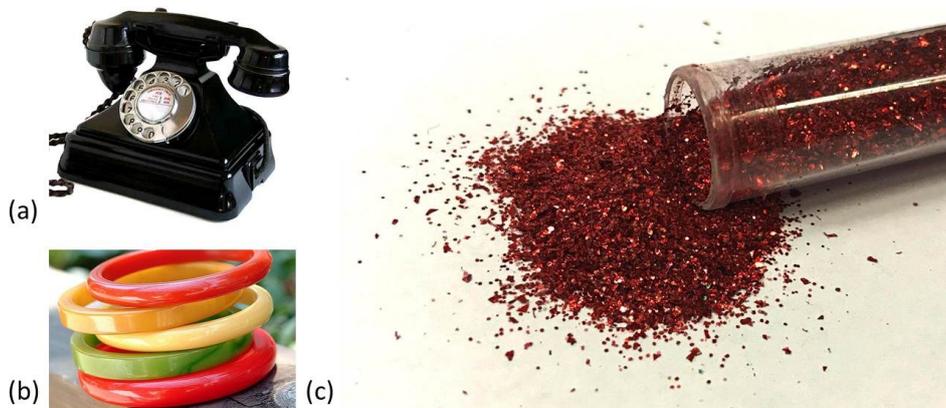


Figure A.1 15 – Aspects plastiques. (a) et (b) Bakélite, Images : Pinterest. (c) Paillettes en plastiques. Image : nationalgeographic.fr.

#### 1.2.5 Noblesse du mat

Depuis quelques décennies, la conscience écologique est de plus en plus forte, du moins dans les pays européens. Cette conscience prône un rapport à la nature plus direct, et incite à une plus faible consommation de produits manufacturés. En ligne de mire, le plastique, dérivé du pétrole dans la plupart des cas. Crédo sous-jacent : « le naturel est mat » ! Le retour à des matières dites « nobles », comme le bois non-vernifié, l'argile, la pierre rustique, le lin, le cuir, se constate dans les émissions télévisées et les magazines spécialisés. La mode du recyclage et

des matières vintage engendre un plus fort trafic d'objets anciens, vieillis, et souvent mats. Perrault écrivait en 1691 [24] :

« Les vases précieux de cristal et d'agate  
Où l'or en mille endroits éclate,  
Et qu'un art curieux avec soin façonna,  
N'eurent jamais pour lui, dans leur pompe inutile,  
Tant de beauté que le vase d'argile  
Que la Bergère lui donna. »

Ces vers semblent trouver un nouvel écho aujourd'hui ! Les matières mates dégagent une impression positive ; on les associerait en marketing à des qualificatifs tels que « naturel », « sain » et « écologique », trois mots positifs, et non plus à « pauvre », « vieux » et « sale » ! Les restaurants à l'esthétique « vintage » ou industrielle fourmillent, où tout est patiné et mat, les brocantes n'ont jamais été aussi « tendance ». Les fabricants de peinture ne jurent que par les produits au rendu mat, tout comme les fabricants d'électronique, qui adaptent le rendu des smartphones et des ordinateurs (Figure A.1 16)<sup>1</sup>.

L'industrie des cosmétiques à son tour lance depuis assez peu de temps des produits mats, comme des vernis ou rouges à lèvres. Il faut retenir que le mat est devenu tendance, et que cela touche toutes les branches de l'industrie : design, mode, cosmétiques, automobile, peintures, produits manufacturés (Figure A.1 17).

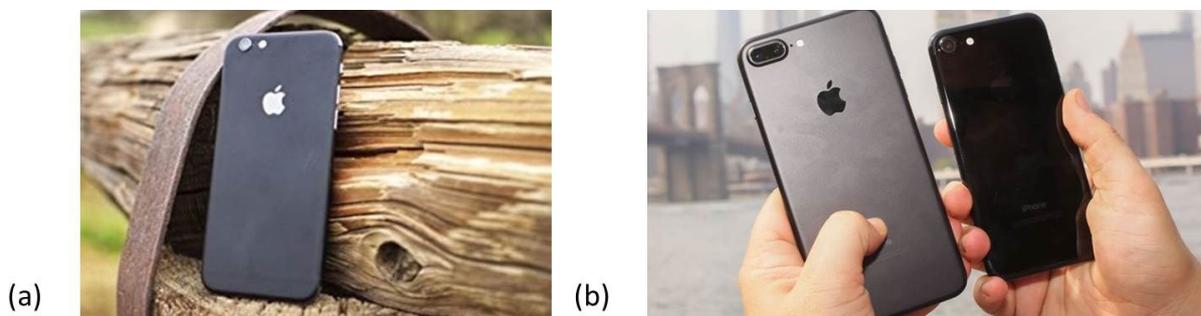


Figure A.1 16 – Publicités présentant le rendu mat des iPhone 7. Notez en (a) l'association subtile faite par le publiciste du téléphone avec le bois, matière noble par excellence !

<sup>1</sup> Il faut noter que l'univers des nouvelles technologies est de manière générale friand des aspects de surface mats, synonyme de high-tech, au rendu proche de celui des composants informatiques.



Figure A.1 17 – Vaisselle mate, à nouveau mise en valeur par du bois rugueux.

Le dégoût engendré par la surenchère de matériaux bon marché brillants a donc ouvert la porte aux aspects de surface mats. Il faut noter que ce retour à la simplicité n'est pas nouveau : le design n'est-il pas un éternel recommencement ? Au tournant du Moyen-Age et de la Renaissance, on peut déjà noter une évolution du brillant vers le mat. Lorsqu'ils peignaient des figures divines, les artistes du Moyen-Age et de la Première Renaissance n'étaient pas avares en feuilles d'or. Le but premier est certes de montrer la richesse du commanditaire, mais il s'agit aussi de rehausser l'éclat spirituel de la Vierge ou du Christ en les parant d'une auréole et d'un vêtement brillants. Mais d'autres artistes ont peu à peu fait un autre choix.

Au brillant certes, la beauté, la gloire, la vie éternelle et la lumière divine. Mais à présent, au mat et au sombre vont une certaine mélancolie, la tristesse et la réflexion. Le brillant est devenu frivole ! On voit Figure A.1 18 une Vierge à l'Enfant très sobre et douce, peinte par Bellini au XV<sup>ème</sup> siècle, d'une dignité et d'une rigueur qui semblent annoncer déjà la Réforme. On est bien loin des Vierges dorées contemporaines ! Le sombre est devenu un signe de qualité, loin de l'ostentation du brillant. La peinture religieuse européenne est fortement empreinte de ces idées esthétiques, qui vont encore se renforcer au XVI<sup>ème</sup> siècle, avec l'avènement de la Réforme protestante.



Figure A.1 18 – Le contraste entre les deux représentations témoigne des qualificatifs accordés au brillant et au mat. (a) Vierge et Christ en majesté, inondés de lumière ; Giovanni Di Marco, dit Giovanni Dal Ponte, détail d'un panneau de bois, Quattrocento, Galerie de l'Académie, Florence. (b) Vierge à l'enfant d'une étonnante sobriété, dit *Madone Grecque*, Giovanni Bellini, 1460-1464, tempera sur panneau de bois, Pinacothèque de Brera, Milan. Images : M. Page, C2RMF, 2018.

Le mat peut donc être synonyme de qualité et de noblesse. Le brillant, qui semble à présent parfois vulgaire, n'est plus associé aux attributs positifs de richesse et qualité : le mat l'a remplacé. Ce qui semble s'expliquer comme nous l'avons vu conjointement par la débauche d'objets en plastique sans valeur, et par le désir d'un nouveau modèle de vie, plus sain et naturel, où les matières nobles sont mates.

### 1.2.6 Esthétique du contraste

Pour mettre en valeur le mat, et réciproquement le brillant, le meilleur moyen est encore de les juxtaposer. Dans l'art européen de la sculpture, il semblerait que ces effets de contraste entre surface mate et surface brillante aient été fréquemment utilisés pour insuffler de la vie, comme le montrent les Figure A.1 19 et Figure A.1 20.

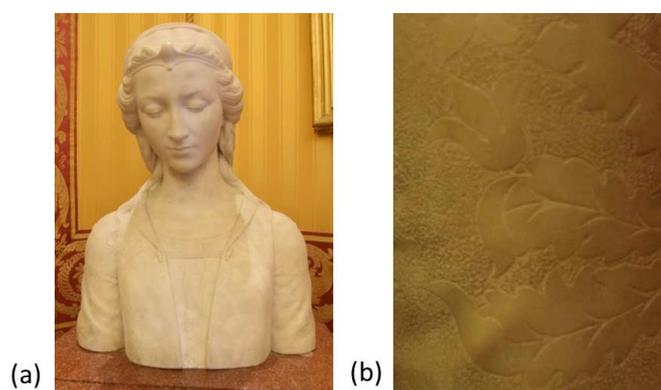


Figure A.1 19 – Effets de matière par le contraste mat/brillant. (a) Giovanni Bastianini, *Buste d'une jeune fille*, marbre, XIX<sup>ème</sup> s., Inv. 5398, Palais Pitti, Florence. (b) Détail de la manche. Images : M. Page, C2RMF, 2018.

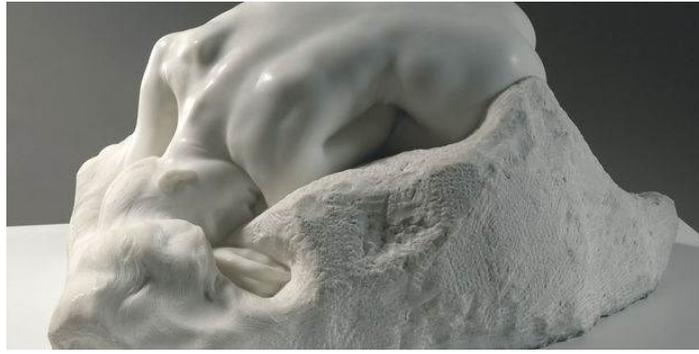


Figure A.1 20 – Fort contraste entre le corps lisse et brillant de la Danaïde et le rocher rugueux sur lequel elle s'appuie. Rodin, *La Danaïde*, 1889, marbre, Ph. 03733, musée Rodin.  
Image : Christian Baraja, Musée Rodin.

Le jeu entre les matières mates et brillantes donne de l'intérêt à des coupes conventionnelles : le tissu mat donne de la profondeur au tissu brillant (Figure A.1 21). On parle de contraste du brillant.

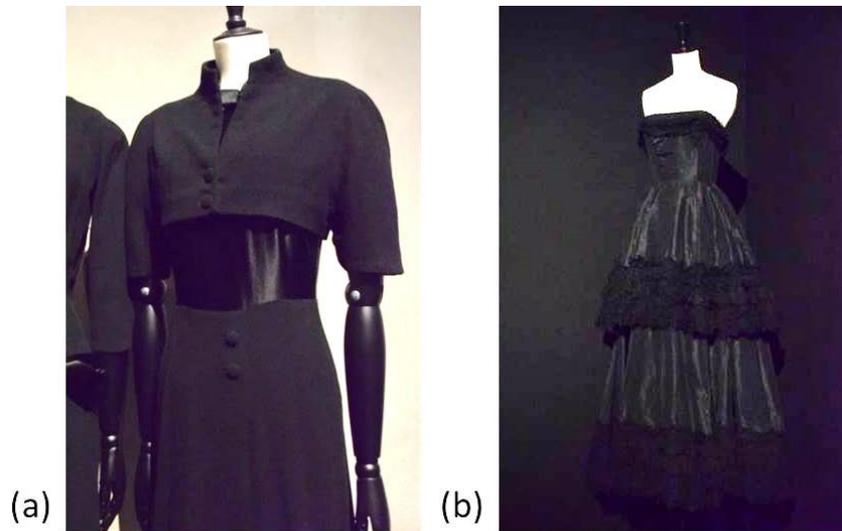


Figure A.1 21 – Noir brillant et noir mat, Cristóbal Balenciaga. (a) et (b) issues de l'exposition *Balenciaga, L'œuvre au Noir*, présentée au Musée Bourdelle au printemps 2017.  
Images : M. Page, C2RMF, 2017.

« Aux surfaces sourdes et mates des lainages ou des velours d'encre profonds, le couturier oppose l'éclat des rubans de satin lisse et luisant ou les reflets soyeux d'un taffetas. Ces contrastes de matières noires, qui ne révèlent leurs qualités que dans la lumière, lui permettent de marquer discrètement la place d'une taille, d'animer la ligne d'une jupe droite ou de contrebalancer un volume. Car chez Balenciaga, le noir, plus qu'une couleur ou même une non-couleur, est une matière vibrante, tour à tour opaque ou transparente, mate ou brillante, tout en jeux de lumière qui doit autant à la somptuosité des tissus qu'à l'apparente simplicité de ses coupes.» [25] Balenciaga, qui créa des pièces totalement noires, le noir cher aux espagnols, joua donc sur les contrastes entre les matières, entre le brillant et le mat, l'ombre et la lumière. On retrouve toute une esthétique du contraste.

Dans la peinture figurative, le brillant (qu'il s'agisse de rehauts de vernis ou d'application de feuilles d'or) est ajouté par l'artiste pour créer du relief par contraste avec la surface initialement mate. Des peintres, à des époques différentes, tels que Gentile da Fabriano ou Gustav Klimt, sont connus pour utiliser l'or brillant pour créer du relief et séparer les différentes parties de la toile : « La particularité du « Cycle d'Or » ne consiste pas seulement en l'utilisation massive de l'or pur en feuilles et du papier doré, mais repose surtout sur le rôle structurel qu'il joue dans la peinture. En effet, si – comme dans la mosaïque byzantine – l'or de Klimt vise à transfigurer la réalité, à fixer l'image d'une transcendance sublime et éternelle en la figeant dans la distance et la perfection du métal, l'utilisation qu'en fait l'artiste rappelle plutôt la technique de Gentile da Fabriano. L'or n'est jamais un simple fond mais, par ses deux qualités d'opacité et de brillance, il module le rapport entre les parties planes et les parties en relief de la surface » [26].

### 1.2.7 Une notion occidentale

Précisons enfin que tout ce que nous venons de signaler est valable pour les sociétés européennes. Les critères culturels occidentaux ne peuvent être transposés ailleurs. On peut quand même signaler que l'aspect symbolique du brillant et de la lumière force de vie semble universel, mais cela doit s'arrêter là. L'Europe a fait main mise au XVI<sup>ème</sup> siècle sur les grands sites d'extraction de métaux précieux et a développé une esthétique du brillant qui lui est propre.

Serge Bramly souligne ainsi à plusieurs reprises que l'esthétique japonaise a dédaigné les effets de lumière et de brillant, préférant une lumière diffuse et tamisée, s'indignant même de trop de vivacité ou de netteté dans les reflets brillants [4]. Si Bramly s'attache surtout au lien avec la transparence et le verre, ce qu'il dévoile s'applique également au brillant. Ces différences de culture tendent malheureusement à s'effacer avec la mondialisation mais restent primordiales pour comprendre l'évolution de l'esthétique.

## 1.3 Disparition de la couleur ?

Nous avons parlé du brillant et du mat. Mais la grande absente est la couleur ! Peut-on considérer les aspects de surface sans l'évoquer ? La couleur est un attribut majeur de la perception des objets ; y sont donc également associés certains qualificatifs. Nous allons très brièvement voir ici comment le noir et blanc, déclinés en différents niveaux de brillants, ont à nouveau remplacé la couleur au XXI<sup>ème</sup> siècle.

### 1.3.1 Evolution du langage : du brillant à la teinte

Le vocabulaire employé pour désigner les couleurs est révélateur des évolutions des mœurs. En français moderne, pour nommer les couleurs, l'accent est mis sur la teinte : ainsi, proche de *blanc*, on trouve *crème*, *écru*, *ivoire*, *blanc cassé*, puis éventuellement à un autre niveau de signification, *chenu*, *candide*, *virginal*... De même pour le noir : ses synonymes en français sont *ébène*, *brun*, *charbonneux*... Ces mots désignent des tons colorés différents, et non des écarts exprimés en clarté. Ce qui n'a pas toujours été le cas ! En latin, trois mots

existent pour désigner la couleur blanche, et deux mots pour désigner le noir (Table A.1 3). Ces variations de vocabulaire prennent en compte les nuances de luminosité.

	Blanc	Noir
Latin	<p><b>albus</b> : d'un blanc mat. Par extension : blême, pâle, mais aussi clair.</p> <p><b>candidus</b> : d'un blanc éclatant. Par extension : éblouissant, radieux, heureux, favorable, franc, loyal, limpide.</p> <p><b>canus</b> : d'un blanc brillant (en parlant des choses).</p>	<p><b>ater</b> : d'un noir mat, sombre, sans éclat. Par extension : sombre, triste, funeste, cruel.</p> <p><b>niger</b> : noir éclatant. Par extension : sombre.</p>
Ancien haut-allemand	<p><b>wiz</b> : blanc mat</p> <p><b>blank</b> : blanc brillant</p>	<p><b>swarz</b> : noir terne</p> <p><b>blach</b> : noir lumineux</p>
Vieil anglais	<p><b>wite</b> : blanc mat</p> <p><b>blank</b> : blanc brillant</p>	<p><b>swart</b> : noir terne</p> <p><b>blaek</b> : noir lumineux</p>

Table A.1 3 – Blanc et noir en latin et dans deux langues germaniques anciennes [10, 11, 12].

Si on comprend qu'un Inuit possède de nombreux mots pour désigner la couleur blanche, celle de la neige à laquelle son œil est habitué, le fait que la langue latine ait possédé plusieurs adjectifs jouant sur les différences de clarté, et que ces nuances se soient complètement perdues, est plus étonnant. En latin, *ater* désigne le noir mat, un noir du deuil et des ténèbres, quand *niger* désigne un noir brillant, celui de « l'élégance et de l'apparat » [26]. Michel Pastoureau écrit que seules ces deux couleurs, blanc et noir, ont bénéficié d'une richesse lexicale qui joue sur les différences de brillant [27]. *Ater*, qui était le mot le plus fréquent pour désigner le noir, s'est peu à peu « spécialisé » pour définir les objets d'un noir mat, avant de prendre un sens négatif au II<sup>ème</sup> siècle avant notre ère. *Niger* lui, plus rare qu'*ater*, ne désignait que les noirs brillants, puis a servi à qualifier tous les « bons » noirs, comme ceux de la nature et des animaux. Au I<sup>er</sup> siècle, le mot est devenu d'usage plus courant qu'*ater*, et donnera le noir français. Le même schéma se répète pour le blanc : *albus*, autrefois plus courant, a fini par désigner uniquement les blancs mats ; *candidus*, qui n'était employé que pour les blancs brillants, s'est étendu à tous les blancs lumineux, et a remplacé le vieux mot *albus*. *Canus* est d'un emploi moins fréquent. Dans les deux cas, blanc et noir, le mot qui désignait la couleur brillante a supplanté l'ancien mot, qui désignait le mat.

Pastoureau indique que les langues germaniques anciennes faisaient la même distinction entre mat et brillant, pour ces deux couleurs seules. Il ajoute que l'étymologie des mots *blank* (le blanc brillant) et *blaek* (le noir brillant) est commune : *\*blik-an*, un verbe germanique qui signifie briller. L'aspect lumineux de la couleur prime sur la teinte même. Cette caractéristique semble propre à plusieurs langues anciennes et montre la réelle prédominance de la lumière dans la perception des hommes de l'Antiquité. Peu à peu, le lexique s'est

appauvri, et ces nuances dans le vocabulaire ont disparu : toutes les langues romanes et germaniques n'ont plus qu'un mot pour désigner le blanc ou le noir. Ce mot unique est par là-même devenu plus riche symboliquement, mais pour faire comprendre les couleurs dans leurs nuances de luminosité ou de saturation, nous n'avons plus d'autre choix que de faire des comparaisons : noir comme le corbeau, noir d'encre, noir comme la poix, blanc comme la neige, blanc crayeux.

On voit donc que si la luminosité et le brillant ont longtemps primé sur les autres attributs de surface, ils se sont inclinés peu à peu face à la couleur, à la teinte.

### 1.3.2 Primauté de la teinte

Regardons l'exemple du vêtement, caractéristique de l'évolution d'une société. Au Moyen-Age, hommes et femmes se vêtent de couleurs, chacune d'entre elles possédant une symbolique particulière. Les étoffes brillantes sont encore assez rares (la soie est tissée dans les villes italiennes depuis le XIII<sup>ème</sup> siècle, et à Lyon depuis la Renaissance seulement), c'est donc la couleur et la qualité de la teinture qui vont donner à une étoffe son prix et son prestige plus que la matière elle-même. De cette période où la couleur primait, nous ne dirons pas grand-chose. Qu'il suffise de s'imaginer que des mélanges qui nous paraissent aujourd'hui audacieux étaient la norme. De même que les années 2000 en noir et blanc vont succéder aux années 70 très colorées, la Renaissance en noir et blanc a succédé au Moyen-Age coloriste. Phases en couleurs et phases en non-couleurs se suivent ; ce qui nous intéresse, c'est que les aspects de brillant prennent le relais quand la couleur disparaît.

### 1.3.3 Disparition de la couleur

Les étoffes très colorées ont donc progressivement disparu pour laisser place au noir et au sombre. Triple effet : de l'émergence de nouveaux procédés de teinture qui rendent la création d'un tissu noir ou bleu profond possible ; de l'invention de l'imprimerie qui a contribué au développement d'une esthétique en noir et blanc ; et de la Réforme Protestante, qui lutta pour une plus grande sobriété et simplicité des mœurs. Tout ceci est longuement explicité par l'historien médiéviste Michel Pastoureau [27]. Néanmoins, les matières brillantes restent l'apanage des classes aisées. Pour se distinguer, sans recours à la couleur qui est en quelque sorte bannie pour un temps, c'est avec les nuances de brillant des matières que les élégants et les riches vont se distinguer. Jusqu'au XX<sup>ème</sup> siècle, on étale sur son costume son rang social. Et on voit tout de suite que plus son possesseur est riche, plus précieuse est la matière du vêtement, c'est-à-dire plus brillante. Soie, satin, taffetas, velours sont des tissus onéreux et qui montrent des reflets brillants ou moirés (Figure A.1 22).

Julie Catherine Bulman écrit : « Les styles vestimentaires de 1700 sont similaires entre les classes, mais les tissus ne le sont pas. Les nobles achètent des jupes et des manteaux en soie, des étoffes de laine, des damas, des brocarts, des taffetas, des satins et des étoffes d'or ou d'argent. Les étoffes de laine sont réservées pour l'hiver en raison de leur capacité isolante. Les salariés et les domestiques portent la laine parce qu'elle est durable et pratique » [28].

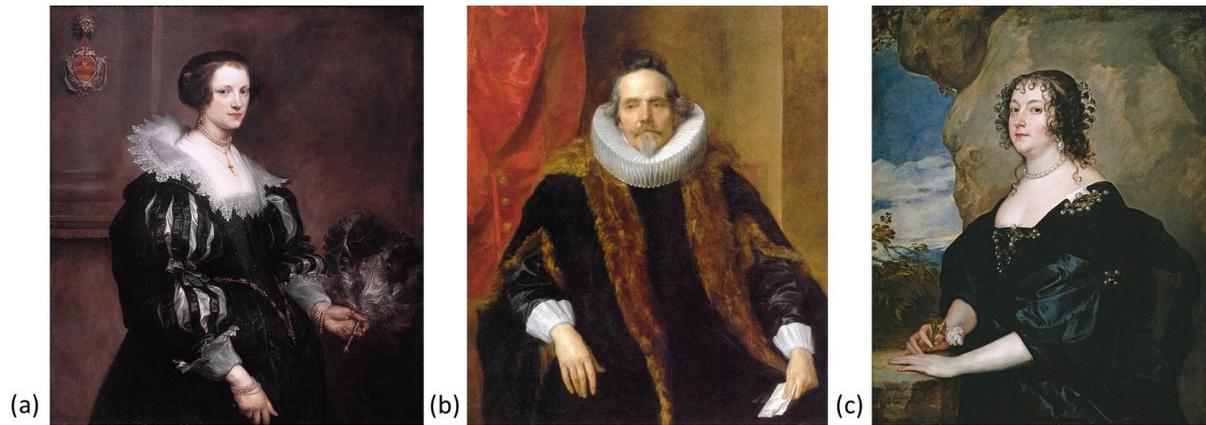


Figure A.1 22 – Exemples de costumes sombres aux reflets brillants de l’aristocratie. Les tissus employés sont luxueux. (a) Van Dyck, *Portrait d’Anna Wake*, 1628, huile sur toile, Inv. 240, Mauritshuis. Image : Mauritshuis, La Haye. (b) Van Dyck, *Portrait de Jacques le Roy*, 1631, huile sur toile, Inv. 135 (1929.9), musée national Thyssen-Bornemisza, Madrid. Image : Musée National Thyssen – Bornemisza. (c) Van Dyck, *Portrait de Diana Cecil*, 1638, huile sur toile, Inv. P001481, musée du Prado, Madrid. Image : Musée du Prado.

Les textiles brillants sont réservés aux élites, tandis que le commun des mortels se contente d’étoffes mates : le brillant de l’habit fait donc le moine. Encore une fois, l’apparition des matières plastiques a renversé la donne, permettant à tout un chacun de porter des vêtements aux reflets soyeux, en fibre synthétique. Et ici aussi, c’est le retour aux matières nobles (coton, lin, laine) qui va marquer la différence esthétique et la conscience écologique. Si la couleur a refait une percée aux XVIII<sup>ème</sup> et XIX<sup>ème</sup> siècles, puis dans les années 60-70, elle paraît avoir à nouveau disparu de notre quotidien, comme en témoignent vêtements noirs, téléphones noirs et voitures grises.

#### 1.3.4 Un monde en noir et blanc...brillant et mat

Figure A.1 23, la différence est saisissante : à gauche, vision d’un monde médiéval fantaisiste et coloré, où l’aristocratie est parée de couleurs vives ; à droite, au XXI<sup>ème</sup> siècle, mannequins et spectateurs sont tous de noir vêtus.



Figure A.1 23 – Couleurs versus noir et blanc. (a) Frères de Limbourg , *Les Très Riches Heures du Duc de Berry*, mois de mai, 1412-1416, peinture sur velin, MS.65, musée Condé, château de Chantilly. Image : R.-G. Ojéda, R.M.N. (b) Détail d'un défilé de mode contemporain, Alexandre Vauthier, printemps-été 2013. Image : luxe.supdepub.com.

Le point que l'on souligne ici est que les jeux de matière et de brillant ont pris plus d'importance que la couleur même des tissus, ou d'une manière plus générale, des objets. Il suffit d'un regard dans la rue pour s'en convaincre : les voitures sont blanches, grises ou noires, à différents degrés de brillant. Ce n'est plus la couleur qui fait la différence entre les produits, mais leur aspect de surface : brillant ou non.

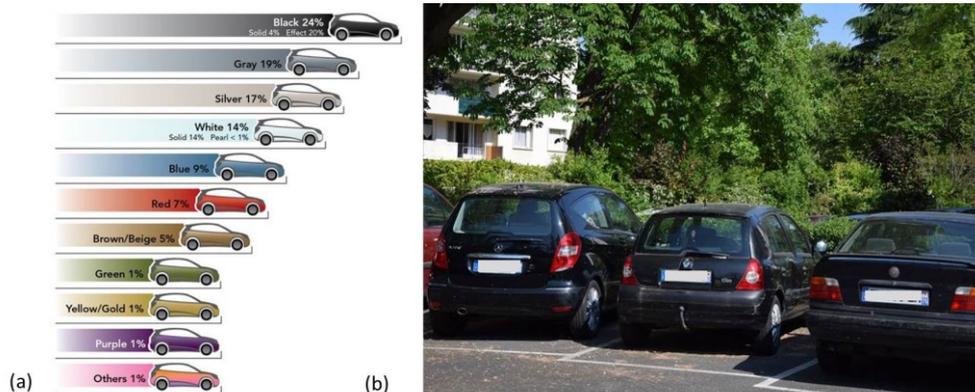


Figure A.1 24 – (a) Couleurs des voitures en 2015. Le noir, le gris (également dans sa version argenté) et le blanc dominent largement le marché. Ce que le graphique ne dit pas, c'est que le brillant des peintures change ! Image : DuPont Automotive Systems. (b) Un exemple de variations de brillant, sur des voitures noires. Image : M. Page, C2RMF, 2018.

Les constructeurs précisent que toutes les teintes sont disponibles en plusieurs niveaux de brillant : « les fabricants automobiles peuvent choisir parmi des effets distincts comme le mica, les éclats de verre, l'aluminium fin éclatant et les pigments à couleur changeante » [29]. Blanc ou noir nacré, métallisé, mat ou avec d'autres effets : la gamme qui joue sur les reflets est large.

## 1.4 Transition

Nous avons vu que l'attrait pour le brillant, qui était très marqué dans les sociétés occidentales contemporaines, est en train de progressivement changer ; les aspects de surface mats sont devenus « tendance ». Cela se vérifie dans des secteurs aussi divers que la mode, la vaisselle, les nouvelles technologies, la peinture, les cosmétiques. Les objets mats sont devenus symboles de qualité, de naturel et de simplicité, et sont prisés dans une société fatiguée du brillant. De plus, les surfaces brillantes sont à présent presque constamment associées à des surfaces mates, pour mettre en valeur les reflets de lumière et donner de la profondeur aux objets. Il y a donc un réel enjeu économique dans la création de surfaces et d'objets mats. Nous allons voir maintenant quelles sont les méthodes de fabrication d'objets mats.

## 2. Objets mats

Les objets manufacturés mats sont reconnus pour leurs qualités visuelles et le message positif qui leur est associé. Considérons donc à présent la question non plus du point de vue esthétique, mais du point de vue pratique. Comment fabrique-t-on un objet mat ? Nous présentons ici quelques procédés utilisés dans l'industrie ou l'artisanat pour créer des surfaces et objets au rendu mat.

### 2.1 Procédés de fabrication traditionnels

#### 2.1.1 Industrie du verre

Les industriels du verre proposent des produits dits « dépolis » ou mats – dont deux exemples sont donnés Figure A.1 25 – qui ont le double avantage de diffuser avantageusement la lumière ambiante et de rendre invisible ce qui se situe derrière la surface [30]. Ces verres mats sont obtenus par différents procédés. Le plus connu est le **sablage**, au cours duquel le verre est attaqué par de petites particules de sable (ou de corindon). Cette technique présente des désavantages : incrustation de particules, poussières, taux de pertes élevé... C'est pourquoi un autre procédé peut lui être préféré : le **matage**. Il s'agit d'un traitement chimique au cours duquel des surfaces claires sont trempées dans des bains d'acide ou soumises à des environnements riches en vapeurs acides (souvent de l'acide fluorhydrique). Ce procédé est hautement toxique mais son rendu est de bonne qualité.

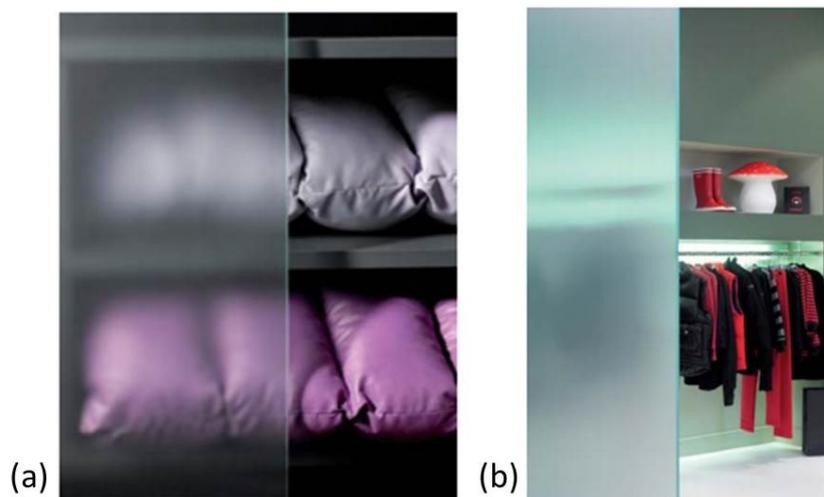


Figure A.1 25 – Verres dépolis issus de la plaquette de présentation des verres mats Saint-Gobain et obtenus par matage à l'acide.

D'autres techniques sont connues :

- Bains de fluosilicate de sodium mêlé à de l'acide chlorhydrique, de l'acide fluorhydrique et de l'eau (hautement toxique). [31]
- Fusion de sels de métaux alcalins, de nitrate ou de sulfate. Cette technique compliquée est utilisée au Japon [31].
- Des pâtes mates, composées d'acétate de sodium, de sulfate de baryum, d'acides fluorhydrique et sulfurique peuvent aussi être utilisées, mais elles sont très toxiques. [31].

Saint-Gobain a récemment proposé une nouvelle méthode pour créer une surface mate. En coulant le verre dans un moule spécifique (par le procédé de **nano-impression lithographique**), on peut apposer à la texture du verre des motifs originaux, comme le présente les Figure A.1 26 et Figure A.1 27.

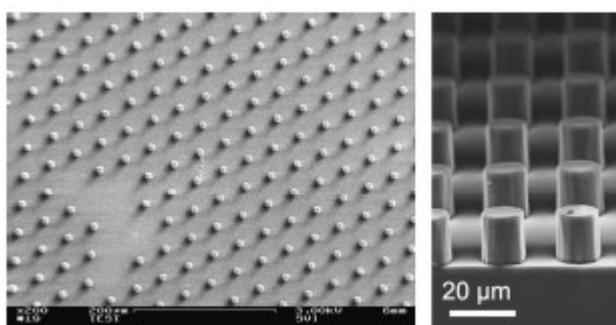


Figure A.1 26 – Photographies au microscope électronique à balayage de surfaces en silice hybride créées par nano-impression lithographique. Figure intégrée dans le manuscrit [32].

Image : C. Turbil, UMR Saint-Gobain / CNRS-Surface du verre et Interfaces.

L'ajout de micro-piliers à une très petite échelle (20  $\mu\text{m}$  en écartement, quelques dizaines de micromètres en hauteur) dans l'épaisseur du verre produit une augmentation de la rugosité du verre, donc une diminution de son brillant [33]. En appliquant un motif de piliers dans du

verre, cette équipe obtient ainsi des surfaces très mates. Ce procédé, complexe, est nettement moins dangereux que le matage.

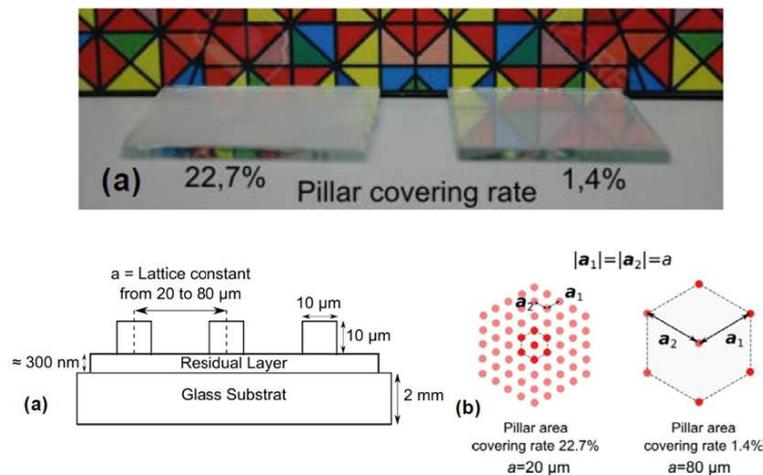


Figure A.1 27 – Piliers implémentés dans une structure en verre, par impression nano-lithographique. Le verre résultant est plus ou moins mat, selon la densité de piliers construits [33].

L'industrie du luxe utilise également divers procédés pour créer des rendus mates. Ainsi chez Lalique, le matage est couplé à deux étapes de satinage et polissage (voir Figure A.1 28) [34]. Les états de surface transparents du verre sont ainsi modifiés pour créer un rendu opaque. Lalique met fortement en avant ses rendus de surface spécifiques, sur verre ou cristal. Citons : « Le satinage est le traitement de la matière le plus caractéristique des créations Lalique. Jouant avec l'ombre et la lumière, il donne du relief aux sculptures. Il permet aussi d'obtenir des effets de matière restituant, à l'œil comme au toucher, le satiné de la peau, la rugosité d'un minéral ou le duveté d'un végétal. Ultime étape de finition, le polissage confère à la matière son poli et toute sa brillance. Réalisé avec une meule lustrante, il permet de redonner de la lumière et d'accentuer certains reliefs. L'opposition entre mat et brillant rend les pièces plus vivantes... » [34].

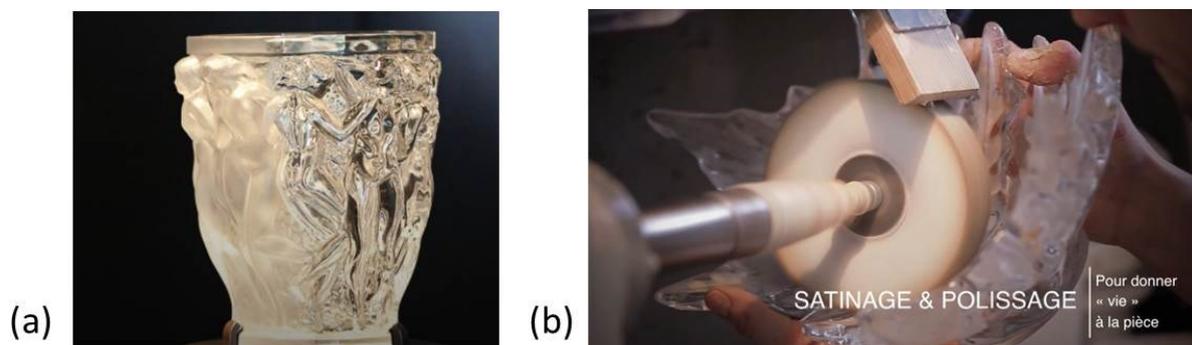


Figure A.1 28 – Cristal Lalique. (a) Cristal avant et après matage. (b) Etape de satinage sous meule. Images : Musée Lalique.

### 2.1.2 Peintures et vernis

Les fabricants de peinture rivalisent d'idées design pour vendre des produits brillants, mats, satinés ou encore d'aspect « velours ». La peinture mate est ainsi recommandée pour masquer les défauts du support, et pour résister à un lavage léger (car poreuse).

Ce terme « poreux » associé au rendu mat est intéressant : il semble supposer que la peinture mate possède une texture particulière, la porosité étant peut-être la conséquence d'une certaine granulométrie. Les informations industrielles ne se trouvent pas facilement, mais plusieurs astuces circulent sur le net. Il est certain que la peinture dite « mate » contient un **agent matifiant**, ou « base à mater », à plus ou moins forte dose. Les bases matifiantes sont vendues dans le commerce, pour matifier les bois, laques, vernis ou peintures. On suggère également l'ajout de 0.5 à 1% de **silice pyrogénée** (les fournisseurs Aérosil ou Cabosil en vendent), ce qui épaissira la peinture. On précise que pour ajouter un agent matifiant à une peinture, il faut que les liants aient même composition chimique (acrylique, glycéro, polyuréthane...).

Les agents matifiants peuvent aussi être ajoutés à du vernis. Plutôt qu'acheter une base à mater, on obtient un rendu similaire en prenant de la **fécule de pomme de terre**, comme sur la Figure A.1 29, ou de maïs. La cire d'abeille ou la caséine sont aussi utilisés. Dans tous les cas, matifier un liant demande plusieurs étapes et l'ajout d'un ou plusieurs composés pour augmenter la rugosité du produit original.



Figure A.1 29 – Vernis brillant et fécule de pomme de terre. Image : sortezdevosconapts.com.

Une rapide investigation sur de la peinture mate et de la peinture brillante achetée dans le commerce donne les images présentées Figure A.1 30. On y voit tout de suite que les aspects de surface, à l'échelle microscopique, de ces deux peintures diffèrent très nettement. La peinture mate, assez rugueuse, contient vraisemblablement un agent matifiant qui ne se dilue pas dans les autres composants et permet la diffusion de la lumière.

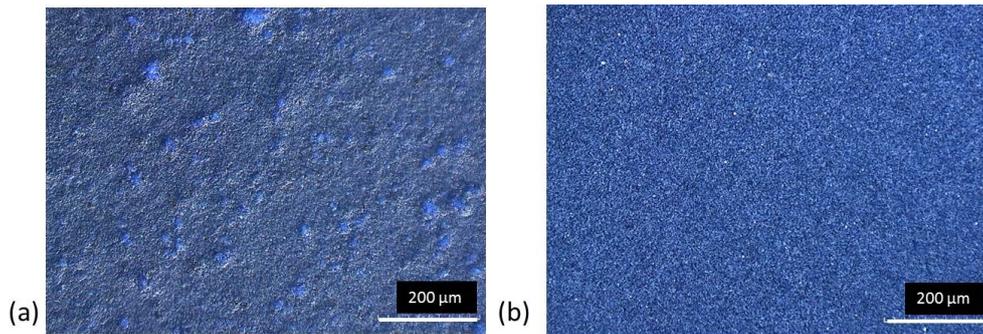


Figure A.1 30 – Vue à la loupe binoculaire de deux surfaces peintes. (a) Peinture dite « mate », vendue dans le commerce par Pébéo™. (b) Peinture dite « brillante », également Pébéo™.

L'exemple du Bleu Klein est intéressant : il s'agit d'une peinture développée par Yves Klein et son marchand de couleurs Edouard Adam dans les années 50. Yves Klein brevètera cette couleur sous le nom d'International Klein Blue, IKB. La peinture IKB est caractérisée par une couleur bleu profond, et par un niveau de matité très important. L'étude de ce pigment et de sa recreation a fait l'objet d'un mémoire de restauration [35] qui a cherché à caractériser la couleur, la texture et le brillant de recreations à différentes proportions de pigment et de liant.

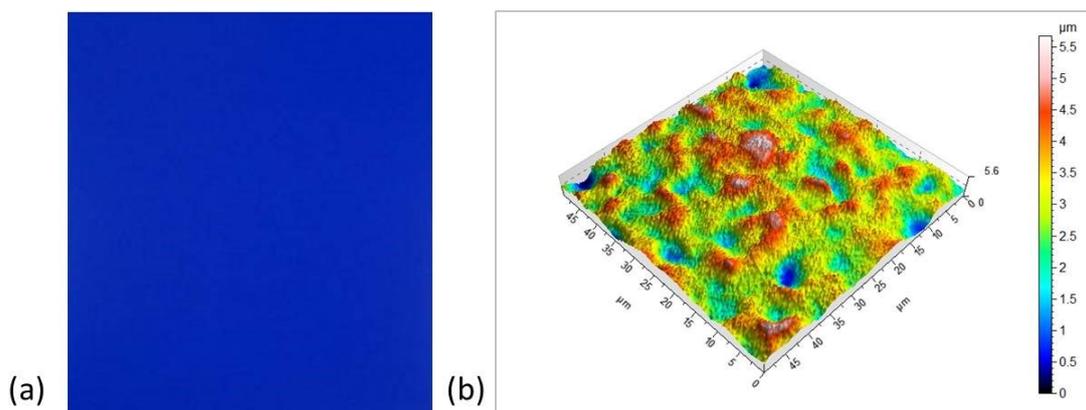


Figure A.1 31 – Texture d'un essai de recreation du bleu Klein effectué par Gabriel Bernard. (a) Couleur de l'IKB. Image : encycolorpedia.fr. (b) Topographie précise de la texture d'une recreation sur 50 x 50 µm. Image : G. Bernard, C2RMF, 2017.

La peinture IKB présente une structure fortement rugueuse, à une échelle très fine (voir Figure A.1 31). Les reliefs ne font pas plus d'une dizaine de micromètres de côté, sur une hauteur de 5.5 µm au maximum. Il s'agit d'un cas extrême, qui présente une surface presque parfaitement diffusante grâce à la **forte concentration en pigments** solides dans le liant.

Enfin, citons dans les peintures mates le Vantablack™, le noir le plus noir au monde : développé par la société Surrey Nanosystems™, ce produit – composé de **nanoparticules de carbone** insérées dans un solvant – absorbe toute la lumière [36]. La peinture est donc

parfaitement mate, mais son application reste difficile, et ne peut se faire sur tous les supports.

### 2.1.3 Sculpture

En sculpture, différents procédés existent pour donner à la pierre un aspect brillant : polissage au papier de verre très fin, cire, vernis, pâte à polir, lustrage mécanique à la perceuse, poudre frottée avec un chiffon, talc... Mais pour faire du mat, la méthode est unique : il faut **poncer**. Le sablage, méthode de ponçage au jet de sable abrasif, est largement utilisé pour donner un aspect rugueux aux surfaces. Aspect mat et aspect brillant sont illustrés Figure A.1 32.

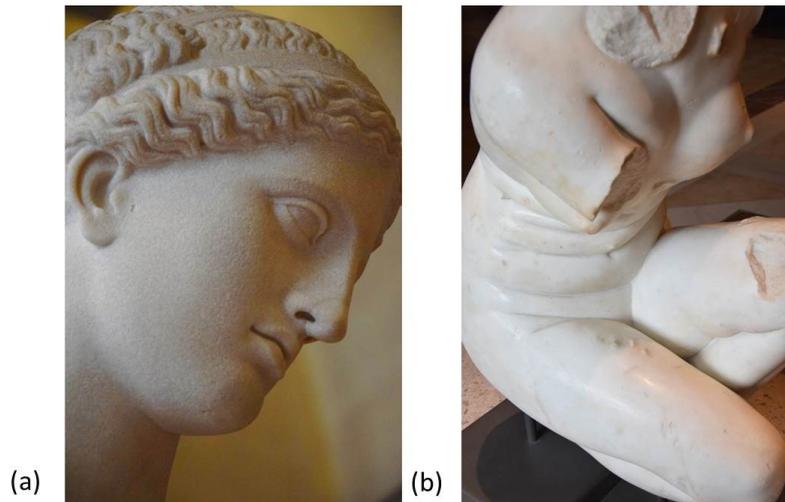


Figure A.1 32 – Effets de matière. Il est possible que la texture mate s'explique par la présence nécessaire d'un support rugueux auquel la polychromie peut adhérer. Ou alors s'agit-il d'un choix esthétique ? (a) Tête rugueuse et mate de la Vénus d'Arles, 1er siècle av. J.-C., Musée du Louvre. (b) Corps brillant de la Vénus de Vienne, I<sup>er</sup>-II<sup>ème</sup> siècle après J.-C., Musée du Louvre. Images : M. Page, C2RMF, 2018.

### 2.1.4 Autres matériaux mats

Notons simplement :

- qu'un métal au rendu mat peut s'obtenir par sablage ou par ponçage. L'attaque chimique est également employée, mais elle a le défaut de modifier la teinte de la surface.
- Le papier photographique brillant a un rendu lisse et souple, doux au toucher ; il permet des couleurs très vives et nettes. Il est très souvent préféré au papier mat, plus rugueux et aux teintes souvent plus fades [37]. Le papier photographique mat est constitué par une couche de grains d'amidon déposée sur de la baryte, sous la gélatine [38].
- que les textiles mats, comme le lin, la laine ou le coton, sont ceux dont les fibres sont épaisses et pelucheuses, à la différence des fibres de soie qui sont très lisses. Un même matériau, le coton par exemple, tissé avec trois armures différentes, donnera trois textiles aux niveaux de matité différents : lisse et brillant pour le satin, moins lisse et mat pour la toile, très rugueux et mat pour la serge (Figure A.1 33). L'armure satin est en effet celle qui est la plus « serrée », dont le relief est le moins important ; c'est donc la moins rugueuse, et celle qui va donner le tissu le plus brillant.

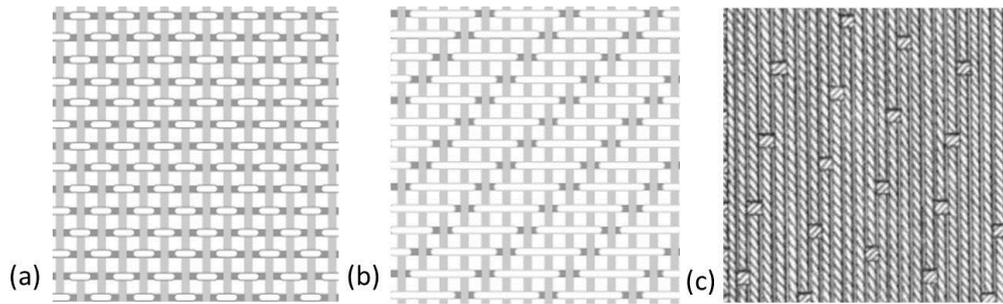


Figure A.1 33 – Trois armures très utilisées : (a) l'armure toile, (b) l'armure serge et (c) l'armure satin. Images : wikipedia.fr.

- Les cosmétiques mats, très à la mode cette année, sont constitués de poudres ou de pigments très concentrés. Comme pour le bleu Klein, il faut trouver le bon dosage entre liant et pigments pour que le produit soit applicable sur le corps et très mat.
- Le plastique peut être usiné pour présenter un aspect mat. Le plus souvent, il est moulé dans un support rugueux, ce qui le rend diffusant.

## 2.2 Cadre du patrimoine

Nous l'avons dit en introduction : notre travail se place dans le cadre de la conservation-restauration des objets du patrimoine. Dans ce domaine se placent de très nombreux matériaux, qui peuvent être séparés en quatre catégories selon leurs aspects de surface (Table A.1 4) : les matériaux naturellement brillants (plutôt rares : quelques métaux, cristaux, l'ivoire, l'os), ceux qui sont travaillés ou fabriqués pour être brillants (comme les pierres précieuses, la céramique glaçurée, le bois, la peinture, le verre), ceux qui sont travaillés pour apparaître mats (certains métaux et matériaux propres à la sculpture, le verre), et enfin ceux qui ne peuvent être travaillés et sont laissés naturellement bruts (le plâtre, la brique, l'ocre, etc). Parmi les objets travaillés pour être brillants, il faut subdiviser en deux catégories : les matériaux qui restent brillants malgré l'usure du temps (assez rares ; on peut citer le marbre et le bitume, s'ils sont bien conservés), et ceux qui deviennent mats au cours de leur existence (bois, métaux, verre, fresques...).

Afin d'envisager au mieux notre sujet avant d'entrer dans la partie scientifique du manuscrit, regardons quelles sont les caractéristiques visuelles des matériaux du patrimoine. Les exemples donnés dans cette partie sont largement extraits de ce domaine ; il s'agit d'objets et de types de matériaux que l'on trouve dans les musées d'art, d'archéologie, d'ethnographie et d'anthropographie.

Surfaces naturellement brillantes	Surfaces travaillées pour apparaître brillantes	Surfaces travaillées pour apparaître mates	Surface naturellement mates et non travaillées
Or Os Ivoire Cristaux	Métaux Pierres précieuses Céramique Bois Marbre Peinture Verre	Métaux Pierre Marbre Verre	Plâtre Brique Ocre Pastel

Table A.1 4 – Quelques matériaux, naturellement brillants ou mats, travaillés ou non.

Arts graphiques	Ocre pariétale Fresque Encaustique Aquarelle Pastel	Tempéra Encre de China Huile non vernie Gouache	Huile vernie Acrylique
	Poterie Argile Terre cuite Céramique non glaçurée	Céramique sigillée	Porcelaine Terres glaçurées Faïence et grès glaçurés
Arts du feu		Vitraux très abimés	Emaux Verre Cristal de roche
	Bronze corrodé	Bronze	Argent Cuivre Or
Matériaux organiques	Papiers, parchemins Textiles (laine, lin, coton) Bois bruts ou anciens	Os Cuir fanés	Bois poncés, polis Textiles (soie) Ivoire Laque
	Plâtre, stuc Calcaire Pierre de taille Grès	Albâtre Bitume	Marbre poli Pierres taillées Roches polies

**MAT**

**BRILLANT**

Table A.1 5 – Classification de quelques matériaux du patrimoine.

### 2.2.1 Matières mates et matières brillantes

Les produits manufacturés sont souvent travaillés pour que leur état de surface corresponde à un certain goût. Ainsi les objets en métal sont le plus souvent polis, tout comme le marbre, l'albâtre, ou travaillés pour apparaître brillants : tramés comme les textiles, ou glaçurés comme les céramiques.

La classification suivante est employée pour trier les matériaux selon le domaine de la conservation auquel ils se rattachent.

- **Matériaux des Arts Graphiques et Picturaux** : ocre, encaustique, aquarelle, pastel, huile, encre, tempera ou encore gouache sont des produits et des techniques typiques des arts du dessin et de la peinture. Attention, nous désignons tantôt le produit pour lui-même (ocre), tantôt la technique (aquarelle ou fresque). L'ajout de vernis, très fréquent pour protéger la couche picturale peinte à l'huile par exemple, crée un rendu de surface très différent de celui d'un dessin au pastel, illustré par la Figure A.1 34. La texture de la surface est soit lisse, soit très rugueuse.

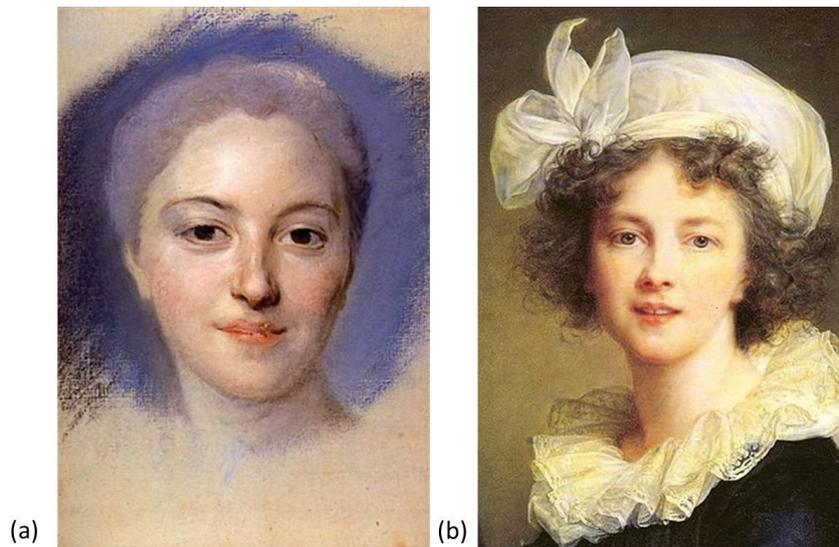


Figure A.1 34 – Pastel contre huile sur toile. La structure granuleuse du pastel donne un rendu mat très caractéristique, tandis que l'huile qui confère une surface lisse (et de plus vernie) a un rendu brillant. (a) Maurice Quentin de la Tour, *Portrait d'une inconnue*, pastel. Image : pinterest.com. (b) Elisabeth Vigée-Lebrun, *Autoportrait*, détail, 1790, huile sur toile. Image : artrenewal.org.

- **Matériaux des Arts du Feu** : céramique, travail du verre et émaillage, métallurgie. Ici aussi, les états de surface vont d'un extrême à l'autre. Les céramiques, poteries, terres cuites, argiles, grès sont très mates, mais l'ajout d'une glaçure, d'un émail ou d'un vernis change leur aspect du tout au tout. Les conditions de température permettent ou non l'apparition d'une couche brillante. Quant au métal, il est travaillé pour apparaître brillant. Si l'or est inaltérable, ce n'est pas le cas des autres métaux, qui sont fortement dégradés par leurs conditions de conservation (Figure A.1 35).

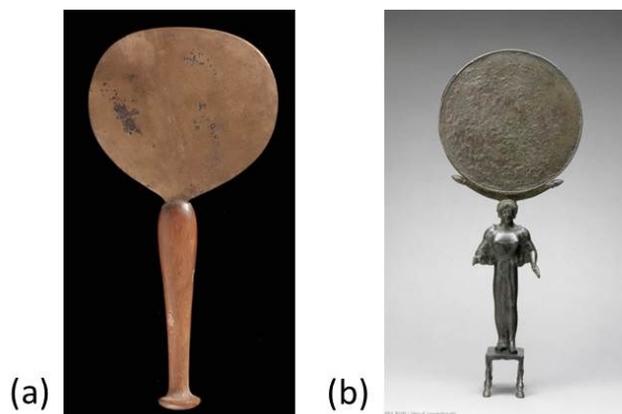


Figure A.1 35 – Miroirs en bronze à deux états de conservation. (a) Miroir égyptien en bronze, 1200 av. J.C. Image : C. Decamps, Musée du Louvre. (b) Miroir grec en bronze, 490-480 av. J.C., Musée du Louvre. Image : H. Lewandowski, RMN.

- **Matériaux organiques** : bois, cuirs, textiles, papiers, os, ivoire, etc. Selon leur état de conservation, ces matériaux présentent des aspects différents. Néanmoins, parchemins, papyrus et papier en fibres de bois sont majoritairement mats, tandis que les objets en corne, os et ivoire présentent un aspect plus brillant. Quelques exemples sont donnés Figure A.1 36.



Figure A.1 36 – Argile, porcelaine et céramique glaçurée. (a) Tablette d'argile, Suse V, 1800-1600 av. J.C., Musée du Louvre. Image : F. Raux, RMN, 2005. (b) Porcelaine de Saint-Cloud, 1700-1710, Musée des Arts décoratifs. (c) carreau de céramique glaçurée islamique, Musée du Louvre. Images : wikipedia.fr.

- **Matériaux inorganiques du domaine de la sculpture** : polis ou glaçurés, présentent un aspect brillant, comme le marbre ou tout type de roches. Sinon, il s'agit plutôt de matériaux mats.
- Enfin, **tous les autres matériaux** : les plastiques notamment, dont on a vu qu'ils étaient majoritairement brillants dans leur forme commercialisée.

### 2.2.2 Impact du temps

Nous l'avons dit, les matériaux usinés ou travaillés pour être brillants résistent mal à la patine du temps : usure, griffures, corrosion, oxydation, patine, assombrissement, chancis, sont autant de phénomènes qui peuvent altérer les aspects de surface des objets brillants.

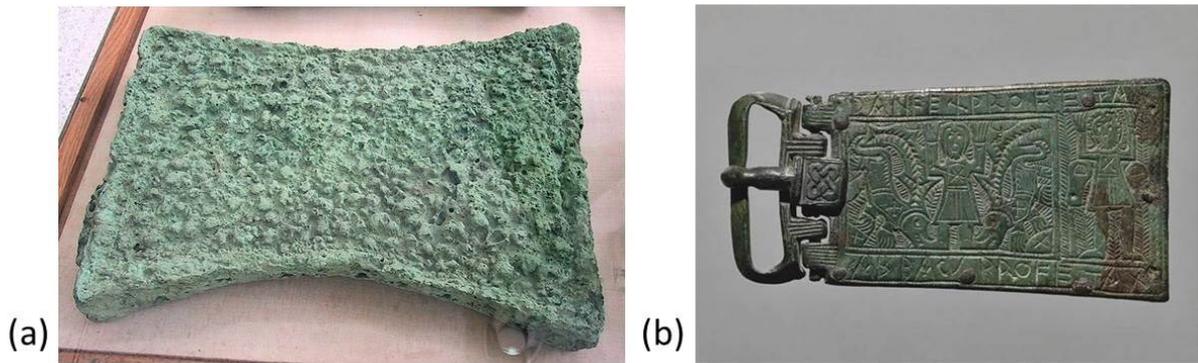


Figure A.1 37 – Cuivre et bronze à différents états de corrosion. (a) Pièce en cuivre provenant de Crète. Image : fracademic.com. (b) Boucle de ceinture en bronze, fin du VI<sup>ème</sup> siècle. Image : G. Blot, RMN.

Nombre d'objets deviennent ainsi mats. La Figure A.1 37 en présente deux exemples : si la boucle de ceinture en bronze paraît peu corrodée, le lingot de cuivre est par contre complètement recouvert d'une couche épaisse de corrosion. Son aspect de surface est intégralement mat. Le temps augmente considérablement la quantité d'objets mats dans la vie quotidienne et les vitrines de musées.

### 2.2.3 Tentative de classification par le brillant

On peut donc établir une sorte de classification des matériaux par leurs aspects mats ou brillants. C'est ce qui a été fait à la Table A.1 5. Nous allons maintenant nous concentrer sur les objets mats uniquement. Nous avons vu que le temps et les conditions de conservation des objets jouaient un rôle important dans le changement d'aspect des surfaces brillantes vers le mat. Mais quels sont les « autres » moyens de faire du mat ? De manière artisanale ou industrielle, quels sont les procédés existants ?

## 3. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre que les aspects mats étaient devenus synonymes de qualité d'un produit. Les objets mats, qui sont très nombreux dans notre quotidien, sont fabriqués selon certains procédés industriels ou artisanaux bien connus. Les procédés traditionnels pour « faire du mat » sont donc relativement nombreux, et adaptés à chaque fois à la structure des matériaux utilisés. Ils sont récapitulés Table A.1 6.

Matériau	Méthode	Catégorie
Verre	Sablage Matage Bains d'acide Nano-impression lithographique	Travail après coup Travail après coup Travail après coup Façonnage direct
Peinture	Jeu sur la concentration relative entre pigments et liant Ajout d'un agent matant Ajout de nanoparticules de carbone	Façonnage direct  Ajout d'un agent mat Ajout d'un agent mat
Papier photographique	Ajout d'une couche d'agent matant	Ajout d'un agent mat
Pierre	Ponçage Sablage	Travail après coup Travail après coup
Métal	Sablage Attaque chimique	Travail après coup Travail après coup
Textile	Tramage rugueux	Façonnage direct

Table A.1 6 – Résumé des différentes méthodes pour « faire du mat ».

On voit que trois catégories se dégagent :

- l'ajout d'un constituant mat directement à la matière ;
- le travail après coup de la matière, mécanique ou chimique ;
- le façonnage direct de la matière pour qu'elle soit mate.

Il n'est pas certain que ces méthodes soient transposables à d'autres procédés de fabrication, plus modernes, comme la fabrication additive. C'est bien là le défi de notre projet, que nous explorerons plus en avant dans la partie suivante.

## Chapitre A.2. Définir, mesurer et reproduire les aspects de surface mats

Dans la partie précédente, nous avons vu que créer des objets mats avait un intérêt esthétique et commercial. Pour caractériser leur aspect de surface, nous allons à présent définir rigoureusement les paramètres d'apparence et nous interroger sur la métrologie du mat.

L'apparence d'un objet est définie par la Commission Internationale de l'Eclairage comme la combinaison de sa couleur, sa texture, son brillant et sa translucidité. Au cours de ce travail, nous nous sommes tout particulièrement intéressés aux aspects de brillant. Comment le brillant, et donc en négatif le mat, est-il défini et normalisé ? Comment l'information de brillant peut-elle être reliée à la rugosité d'une surface ? Comment brillant et rugosité peuvent-ils être mesurés ? Quelle influence le brillant et la couleur ont-ils l'un sur l'autre ? Ce chapitre présente les publications de référence dans le domaine et introduit à la question de la mesure.

# 1. Brillant et mat

## 1.1 Définitions générales

### 1.1.1 Apparence d'un objet

L'**apparence** d'un objet consiste en l'ensemble des informations qui parviennent au cerveau via le système visuel. Elle est définie par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) comme « l'aspect de l'expérience visuelle par lequel cet objet est reconnu. Elle est décrite au moyen de la liste non-exhaustive de ses attributs : sa forme, sa couleur, son brillant, sa texture et sa translucidité, etc... » [39]. Si un de ces attributs permet déjà souvent à un observateur expérimenté de reconnaître une surface (la texture notamment), c'est en les combinant tous que l'on peut avec certitude identifier les matériaux et les objets qui nous entourent.

L'apparence est donc le résultat d'une combinaison entre le système visuel, qui recueille les photons en provenance des objets, et le système cognitif, qui les transforme et les interprète. Cette interprétation est appelée **perception visuelle**.

### 1.1.2 Attributs de premier ordre et attributs de second ordre

La couleur, la texture, la forme ou encore le brillant des objets sont des attributs de l'apparence visuelle. Chubb *et al.* [40] les classent en deux catégories : la forme et la couleur sont considérées comme des attributs de premier ordre, tandis que le brillant, la texture et la translucidité sont dits de second ordre (Figure A.2 1).

Lorsqu'on regarde une surface, un processus complexe se met en place pour créer la vision. Au premier plan, le signal lumineux en provenance de l'objet est recueilli par la rétine, au sein de l'œil humain. Ce signal est ensuite converti et envoyé au cerveau, qui analyse les données reçues et les traduit en « sensations » : de même qu'un aliment nous paraît acide ou amer après contact avec nos papilles et analyse par notre cerveau, un objet nous paraîtra mat ou brillant après vision par la rétine et traitement cognitif.

Il apparaît que les attributs de premier ordre, comme la couleur, la forme ou la taille sont traités au tout début de la chaîne de la vision, lorsque le signal vient frapper la rétine : l'observateur conclut de manière instantanée sur ces paramètres. En revanche, les attributs de second ordre nécessitent l'analyse du cerveau : leur compréhension est moins rapide, et nécessite plus d'étapes. La texture, le brillant, le scintillement ou la transparence sont des attributs de second ordre. [41]

**Remarque :** nous employerons le terme « texture » pour qualifier la texture visuelle, c'est-à-dire l'agencement géométrique des motifs perçus par un observateur sur une surface. Nous employerons les termes « rugosité » ou « structure » pour désigner l'agencement physique de la matière, à l'échelle du micromètre. La texture désignera donc un paramètre visuel, et la rugosité un paramètre physique du matériau.

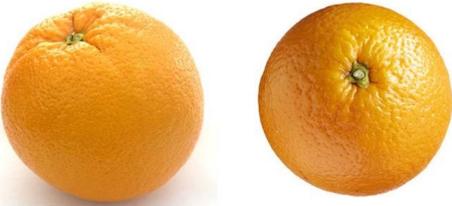
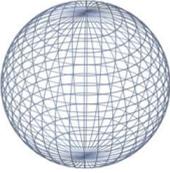
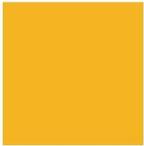
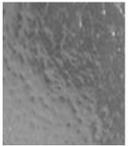
Objet					
Attributs de premier ordre			Attributs de second ordre		
					
Forme	Couleur	Brillant	Texture	Transparence	

Figure A.2 1 – Attributs de premier et de second ordres de l'apparence ; cas d'étude simple.

### 1.1.3 Apparence et qualité

Nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les attributs d'apparence sont fondamentaux dans notre vie quotidienne. Grâce à eux, nous reconnaissons les objets et matériaux, et leur associons des qualificatifs positifs ou négatifs, selon leur aspect : un citron marron apparaît douteux, tout comme une aubergine terne. Lors d'un achat en particulier, le consommateur évaluera (plus ou moins consciemment) les attributs de premier et de second ordre de chacun des objets qui lui sont présentés avant de se décider. En particulier, c'est l'analyse conjointe du brillant et de la couleur qui semble renseigner le mieux sur la qualité d'un produit [42]. Les vendeurs de fruits et légumes, les constructeurs automobiles, les fabricants de peinture ou encore les industriels du luxe seront par exemple particulièrement attentifs aux rendus colorés et mats ou brillants de leurs produits.

### 1.1.4 Problématique : la mesure de l'apparence

L'apparence d'un objet est donc le résultat d'un processus complexe impliquant les propriétés des matériaux ainsi que la vision et la cognition humaines. Pour quantifier des changements d'apparence, il faut donc prendre en compte ces deux aspects : l'aspect physique et l'aspect perceptuel. La colorimétrie, mesure de la couleur, prends ainsi en compte ces deux composantes et propose des espaces de référence dans lesquels les couleurs sont placées relativement à la perception humaine. Si pour le brillant, les choses sont moins avancées, elles ont tout de même évolué depuis que Richard Sewall Hunter (1909-1991), théoricien de l'apparence des matériaux, définissait le brillant pour la première fois en 1952.

## 1.2 Réflexion à une interface

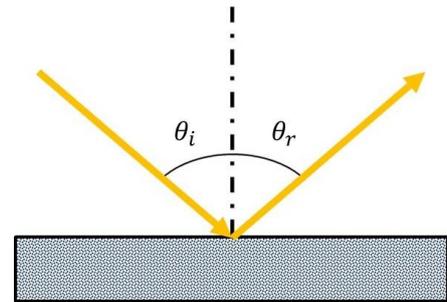
A l'interaction entre un rayonnement lumineux et une surface, différents phénomènes se produisent. Une fraction du flux incident est absorbée par la surface ; une autre est transmise à travers le matériau. Le restant est réfléchi : lorsqu'il atteint la surface, le flux change de direction de propagation, et peut notamment frapper notre œil. La réflexion dépend de la

longueur d'onde de la lumière, mais aussi des propriétés du milieu touché par le rayonnement. En particulier, plusieurs types de réflexions peuvent se produire sur les interfaces, en fonction de la rugosité et des propriétés cristallines des matériaux. La sensation de brillant étant la conséquence de ces réflexions, nous les décrivons ci-après.

### 1.2.1 Types de réflexions

#### 1.2.1.1 *Réflexion spéculaire*

La **réflexion spéculaire** est décrite par les lois de l'optique géométrique, selon l'énoncé de Snell-Descartes, qui stipule que le rayon incident et le rayon réfléchi sont tous deux dans le plan d'incidence, de telle sorte que les angles entre chacun des rayons et la normale soient égaux. Ce type de réflexion se produit à la surface d'une eau calme, sur les métaux, verres, plastiques ou liquides transparents. Les miroirs présentent bien sûr uniquement de la réflexion spéculaire.



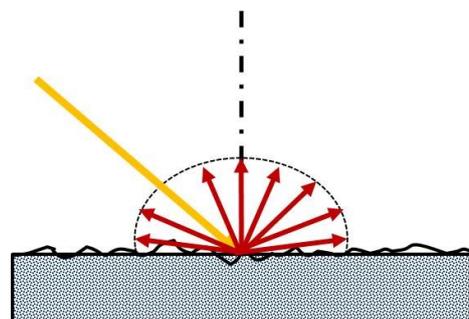
La réflexion spéculaire est totale à la condition que la surface soit parfaitement plane localement : la présence de défauts implique une réflexion de mauvaise qualité. Dans le cas des miroirs conçus pour l'astronomie, les défauts doivent être inférieurs ou de l'ordre de la longueur d'onde incidente pour que la surface soit parfaitement réfléchissante. Ainsi si la lumière incidente est dans le domaine visible (longueur d'onde comprise entre 380 et 780 nm), les défauts ne doivent pas dépasser quelques centaines de nanomètres. Pour créer un miroir parfait, il faut donc polir une surface métallique (qui peut être rugueuse et mate au départ) pour que la taille de ses défauts devienne comparable à la longueur d'onde du rayonnement incident. Une surface qui nous apparaît rugueuse peut être considérée comme parfaitement spéculaire pour un rayonnement de longueur d'onde de l'ordre du millimètre ou du centimètre.

En règle générale, on constate que pour les longueurs d'onde visibles, une surface qui présente de la réflexion spéculaire est une surface très brillante (aspect miroir).

#### 1.2.1.2 *Réflexion diffuse et réflexion de volume*

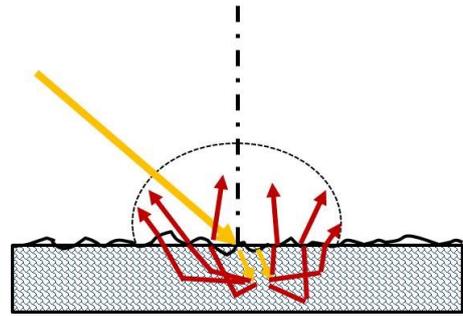
Si la surface d'un matériau présente une rugosité dont les défauts sont de taille supérieure à la longueur d'onde du flux incident, la réflexion est **diffuse**.

Lorsque le rayonnement est réfléchi avec la même luminance dans toutes les directions, la surface est dite **lambertienne**. Il s'agit alors d'un matériau parfaitement mat ; la réflexion diffuse est idéale.



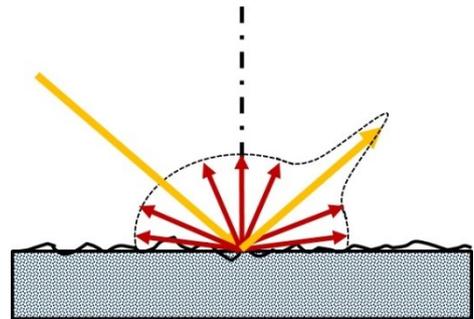
La grande majorité des matériaux (à l'exception des métaux ou des verres) présente de la réflexion diffuse plutôt que de la réflexion spéculaire ; il suffit d'ailleurs de modifier la rugosité de surface des métaux pour que leur réflexion devienne diffuse.

Dans certains matériaux, la lumière est réfléchi par les couches internes du matériau avant de sortir. La **réflexion de volume** est la conséquence des interactions entre le milieu matériel et la lumière. Cette réflexion diffuse est à l'origine de la couleur du matériau.



### 1.2.1.3 Réflexion mixte

En pratique, les matériaux réels présentent à la fois de la réflexion spéculaire et de la réflexion diffuse. La fraction de lumière qui ne pénètre pas dans la matière mais est directement réfléchi (selon les lois de Snell-Descartes) forme le pic spéculaire. Le reste est diffusé, soit à cause de la rugosité de la surface, soit à cause des interactions volumiques avec la matière. On appelle **réflexion mixte** la réflexion qui en résulte.



### 1.2.2 Facteur de réflexion

Considérons une interface « air / matériau d'indice  $n$  ». L'angle d'incidence formé entre le rayon incident et la normale à la surface est noté  $\theta_i$ . On appelle **facteur de réflexion** le rapport « flux réfléchi » sur « flux incident » à l'interface :

$$R = \frac{\phi_R}{\phi_T}$$

Ce rapport est décrit par la **formule de Fresnel** en lumière naturelle comme la somme de deux termes, chacun valant pour un type de polarisation ( $s$  ou  $p$ ), à l'angle d'incidence  $\theta_i$  :

$$R = \frac{\phi_R}{\phi_T} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\cos\theta_i - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}} \right)^2 + \left( \frac{n^2 \cos\theta_i - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}}{n^2 \cos\theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}} \right)^2 \right]$$

Pour  $\theta_i = 0$  (incidence normale), le facteur de réflexion vaut :

$$R = \left( \frac{1 - n}{1 + n} \right)^2$$

Le facteur de réflexion est donc fonction de l'angle d'incidence et de l'indice des surfaces : l'indice du matériau joue donc fortement sur les propriétés de réflexion de celui-ci. Le brillant, qui dépend de la géométrie de la surface, est donc également lié aux propriétés intrinsèques de la matière.

Le facteur de réflexion évolue avec l'angle d'incidence selon la courbe de la Figure A.2 2, établie pour un indice fixé à 1.5. La formule de Fresnel correspond au cas de la réflexion spéculaire, mais ne prend pas en compte les réflexions diffuses. On voit Figure A.2 2 que

lorsque l'angle d'incidence augmente, la fraction de lumière réfléchi par la surface augmente également ; la composante diffuse diminuera donc en conséquence. Cette propriété peut être utilisée pour mettre en évidence la tendance au lustre d'un échantillon de brillant faible : à incidence rasante ( $\theta_i > 70^\circ$ ), la valeur du flux réfléchi augmente nettement [43].

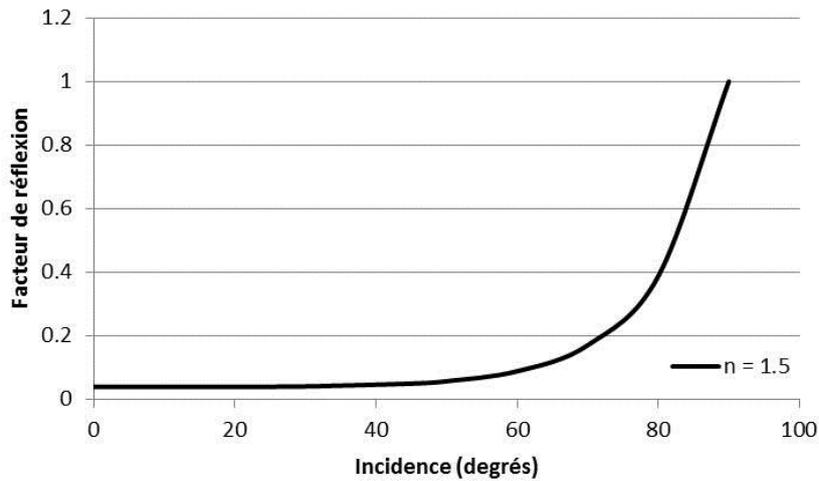


Figure A.2.2 – Evolution du facteur de réflexion avec l'angle d'incidence, pour une lumière naturelle et une interface air/verre par exemple (indice du milieu  $n = 1.5$ ).

### 1.2.3 BRDF

Pour caractériser angulairement les réflexions sur l'ensemble de la surface, la quantité appropriée est la **BRDF** (bi-directional reflectance function – fonction de distribution bi-directionnelle du coefficient de luminance). La BRDF est définie comme le quotient de la luminance d'un élément de surface considéré dans une direction  $r$ , pour un éclairage produit par un rayonnement d'incidence donnée  $i$ . Les conventions angulaires sont données Figure A.2.3.

$$\beta(\theta_r, \varphi_r, \theta_i, \varphi_i, \lambda) = \frac{L(\theta_r, \varphi_r, \theta_i, \varphi_i, \lambda)}{E(i, \theta_i, \varphi_i, \lambda)}$$

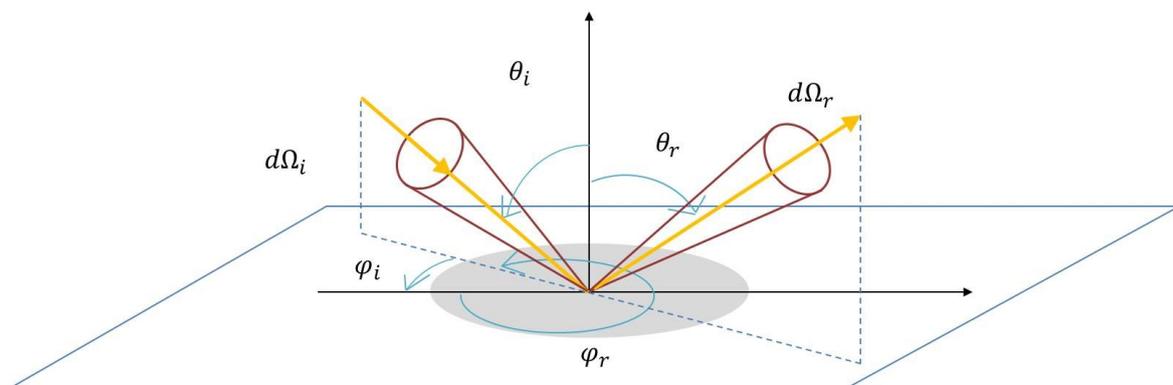


Figure A.2.3 – Conventions angulaires pour l'écriture de la BRDF.

On rappelle que la luminance  $L$  correspond à une densité de flux sur une étendue géométrique, et l'éclairement  $E$  à la densité de flux reçu par une surface, par unité d'aire. [44].

La mesure de la BRDF donne la répartition de la lumière réfléchiée dans tout l'espace, pour toutes les directions d'illumination. C'est une mesure qui caractérise entièrement la réflexion lumineuse sur la surface d'un objet, mais elle est complexe et lourde. En pratique, si la BRDF est utilisée en laboratoires de recherche pour mesurer le brillant, elle n'est pas adaptée aux problématiques industrielles.

Le brillant est une conséquence des propriétés de réflexion et de diffusion des surfaces, perçue par notre système cognitif. Nous allons le définir à présent.

## 1.3 Le brillant

### 1.3.1 Définition du brillant

Le brillant est un attribut de second ordre de l'apparence. En 1952, Hunter le définissait comme l'aptitude d'une surface à simuler le pouvoir réfléchissant d'un miroir parfait [45]. En 1970, la CIE enrichit cette définition comme suit [46] :

« **Brillant** (d'une surface) : propriété de réflexion directionnelle d'une surface responsable du degré auquel les reflets ou les images d'objet peuvent être superposés sur cette surface. »

En 1984, la définition de la CIE évolue [47] :

« **Brillant** (d'une surface) : aspect dans lequel on perçoit des reflets lumineux d'objets comme superposés à la surface par suite des propriétés directionnelles sélectives de cette surface. »

Cette fois-ci, la définition proposée par la CIE prend en compte l'aspect perceptif du brillant. La mesure du brillant va donc être différente selon que l'on considère ou non les aspects psycho-visuels.

Françoise Viénot écrit en 2006 [41] :

« Le brillant est une grandeur visuelle, et de là photométrique, qui dérive de l'analyse de la distribution géométrique de la lumière émanant d'une surface [...] Précisément, l'effet de brillant naît de variations géométriques de luminance. »

Du point de vue strictement physique, pour caractériser le brillant, il faut tout d'abord caractériser la distribution angulaire de la lumière par un matériau. Du point de vue perceptuel, tout le défi consiste ensuite à corrélérer la mesure physique avec la sensation

visuelle produite. On notera que le mat est donc tenu pour l'absence ou la très faible quantité de reflets lumineux d'objets perçus à la surface, par suite des propriétés directionnelles sélectives de cette surface, selon la définition de 1984.

### 1.3.2 Six classes de brillant

R.S. Hunter classe les aspects de surface brillants en six catégories, données Table A.2 1 [45] :

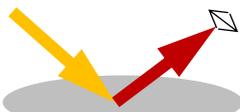
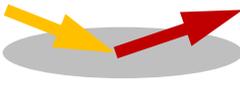
Type de brillant	Description		Gamme de brillant
spéculaire	Rapport du flux réfléchi dans la direction spéculaire sur le flux incident.		Mesuré sur tout type de surface.
de netteté d'image (distinctness of image DOI)	Jugement fondé sur la netteté des images réfléchies.		Utilisé sur les surfaces de brillant très élevé.
à incidence rasante (sheen)	Pour les surfaces mates, qui apparaissent réfléchissantes aux angles rasants.		Utilisé sur les surfaces de brillant très faible.
de contraste	Jugement fondé sur la comparaison de la luminosité de l'échantillon dans la direction spéculaire avec un autre angle, éloigné.		Utilisé sur les surfaces de brillant faible.
de voile (haze)	Rapport de luminosité mesuré dans la direction spéculaire et dans son voisinage.		Présent sur les surfaces de brillant élevé.
de non-uniformité de surface	Dépendance spatiale du brillant.		Utilisé sur des surfaces présentant une texture visible, quel que soit le brillant.

Table A.2 1 – Classes de brillant énoncées par R.S. Hunter en 1937 [45, 44].

Ces six catégories de brillant sont utilisées dans l'industrie et chacune est mesurée d'une certaine manière, mais c'est le brillant spéculaire qui apparaît toujours comme la première mesure à faire et la seule adaptée à un large panel de matériaux. Notons au passage que le

brillant à « incidence rasante » (sheen) ainsi que le brillant « de contraste » sont deux catégories de brillants faibles.

### 1.3.3 Le brillant spéculaire

#### 1.3.3.1 Pic spéculaire

Nous avons vu qu'en pratique, à l'interaction entre un rayonnement lumineux et une surface, la réflexion qui se produit est « mixte » : il s'agit d'un mélange entre réflexion spéculaire et réflexion diffuse. Dans la direction spéculaire, le rayonnement réfléchi n'est donc pas idéalement directionnel, mais plutôt légèrement étalé : il forme un « pic spéculaire ». Dans la direction spéculaire, on observe donc une dispersion angulaire des flux réfléchis, qui dépend des propriétés de la surface considérée – des irrégularités et de la rugosité de la surface. Selon la taille et la fréquence spatiale de ces défauts de surface, le flux réfléchi sera distribué différemment : le pic spéculaire varie angulairement selon ces interactions. Plus une surface est rugueuse (et donc mate), plus son pic spéculaire sera large ; plus une surface est lisse (et donc brillante), plus son pic sera étroit. Ceci est illustré par la Figure A.2 4.

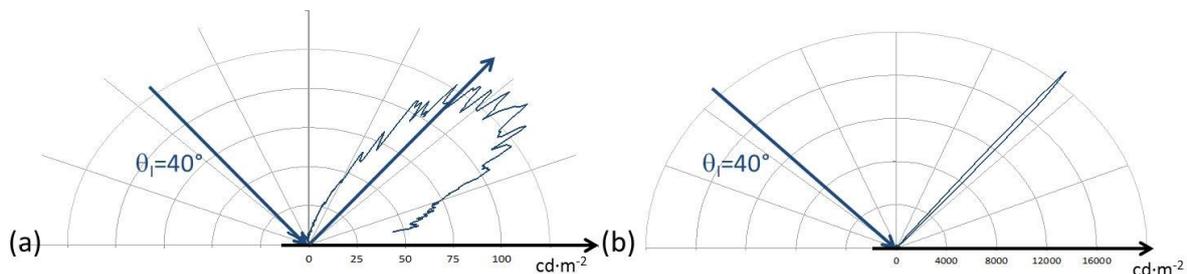
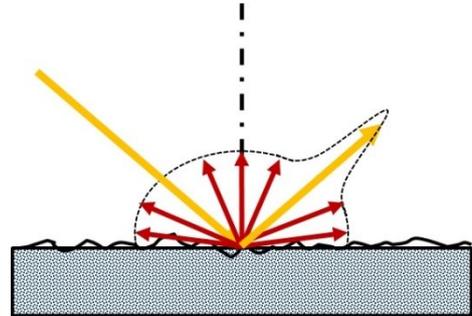


Figure A.2 4 Courbes de luminance directionnelle établies par Obein à l'EZ-Contrast™ pour (a) une surface rugueuse et mate et (b) une surface lisse et brillante. Les pics ont non seulement une amplitude très différente, mais aussi une largeur à mi-hauteur nettement contrastée. Le pic établi pour une surface rugueuse est large et étalé ; le pic établi pour une surface lisse est très fin et droit, bien dirigé dans la direction spéculaire.

#### 1.3.3.2 Brillant spéculaire

On voit donc que, soumise à un rayonnement dans une direction donnée, une surface réfléchit dans la direction spéculaire un flux qui est caractéristique de son niveau de brillant : faible dans le cas d'une surface rugueuse et mate, élevé dans le cas d'une surface lisse et brillante. Pour établir un premier classement des surfaces sans considérer l'ensemble de l'information angulaire, on peut donc restreindre la mesure à l'étude du flux dans la zone spéculaire. La norme ISO 2813 définit ainsi l'**indice de brillant spéculaire** (gloss index), exprimé en unités de gloss (**gloss units GU**) [48] :

« Rapport multiplié par 100 du flux lumineux réfléchi par un spécimen sur celui réfléchi par une surface de verre parfaitement polie, d'indice de réfraction 1.567 à une longueur

d'onde de 587.6 nm dans la direction spéculaire, pour un angle de réflexion spécifié et des ouvertures angulaires spécifiées de la source lumineuse et du détecteur. »

### 1.3.3.3 Glossmètre

Afin de mesurer le brillant spéculaire exprimé en gloss units, on utilise un **glossmètre**, ou brillance-mètre. Le glossmètre, dont le principe est donné Figure A.2 5, contient un étalon de verre noir, tel que spécifié par la définition ci-dessus, fixé à 100 GU aux angles de mesures 20°, 60° et 85° recommandés par la norme ISO 2813.

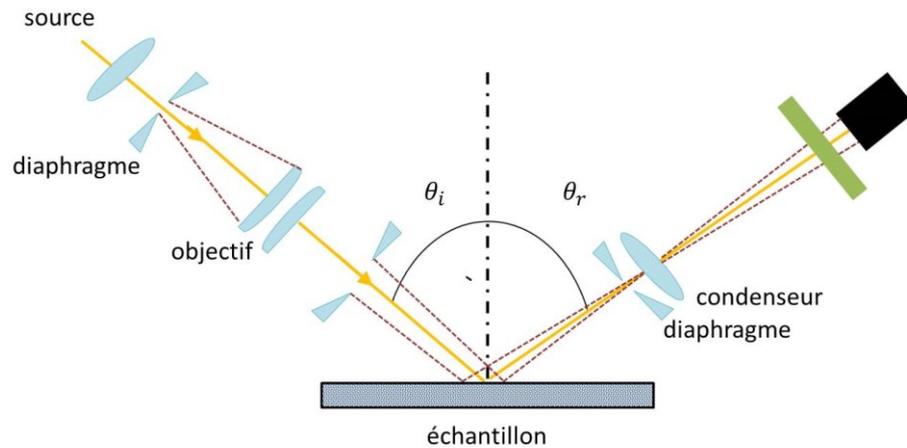


Figure A.2 5 – Principe du glossmètre, d'après Hunter [49], cité par [32].

Cette norme précise que si l'angle d'incidence 60° convient pour tout type de surfaces, l'angle 20° est recommandé pour discriminer les surfaces de brillant élevé et l'angle 85° pour les surfaces mates.

### 1.3.3.4 Problèmes liés à la mesure au glossmètre

Le glossmètre, de par les ouvertures angulaires fixées par la norme ISO 2813 pour chacun des angles d'incidence 20°, 60° ou 85°, n'est en fait pas capable de mesurer le pic spéculaire. Dans le cas des surfaces brillantes, l'ouverture angulaire est trop « large » pour le pic : le signal est moyenné et la mesure finale prend donc en compte plus d'information qu'il ne faudrait. Dans le cas des surfaces mates en revanche, l'ouverture angulaire du glossmètre est trop faible pour prendre en considération l'ensemble du pic : une partie de l'information va manquer. Comme l'indique [32], le glossmètre est incapable de décrire la forme du pic spéculaire.

De plus, [32] mentionne une étude de Leloup [50] portant sur la reproductibilité de la mesure effectuée avec deux instruments d'un même fabricant, ainsi que sur la variabilité entre les résultats donnés par deux glossmètres de deux fabricants différents. Il se trouve que ces deux points ne sont pas satisfaisants : la reproductibilité est moins bonne qu'il ne faudrait, et la variabilité entre fabricants non négligeable. Les normes en vigueur ne sont pas assez strictes pour que les résultats soient suffisamment similaires.

Enfin, il semblerait que l'indice de réfraction du verre utilisé comme étalon de référence ne soit pas toujours bien caractérisé, comme le laisse entendre une étude de 1980 ; cela causerait une erreur de mesure de l'ordre du demi gloss unit sur le brillant mesuré [51].

#### 1.3.3.5 *Couleur et brillant*

Plusieurs choses sont à signaler à propos du lien entre brillant et couleur. Tout d'abord, il faut mentionner qu'une surface noire apparaît plus brillante qu'une surface blanche, à états de surface égaux, car la surface blanche diffuse une fine partie de la lumière [43]. Il serait ainsi a priori plus facile de faire des surfaces mates blanches plutôt que noires. Cependant, cette différence, qui est perçue par l'œil, ne l'est pas par le glossmètre : celui-ci est en effet sensible à la clarté des échantillons. Roire a montré qu'en fonction de leur clarté, quatre surfaces qui apparaissent pourtant similaires en niveau de brillant (toutes les quatre sont mates) sont classées comme différentes par le glossmètre : la surface la plus foncée est à la mesure la plus mate, tandis que la surface la plus claire est à la mesure la plus brillante [43]. Le glossmètre seul ne semble donc pas pouvoir classer de façon satisfaisante les surfaces colorées.

#### 1.3.4 Le brillant perceptuel

Le brillant est une grandeur perceptuelle, c'est-à-dire évaluée de manière cognitive. Comment prendre en compte cet aspect cognitif pendant ou après les mesures ?

##### 1.3.4.1 *Considérer le brillant*

Lorsqu'un observateur est face à une surface dont on lui demande d'évaluer le niveau de brillant, il cherchera à incliner l'échantillon, à le tourner, ou il bougera la tête (Figure A.2 6). En un mot, l'observateur cherche la réflexion spéculaire, et pour ce faire, il analyse angulairement la surface. Par conséquent, le brillant est bien une grandeur angulaire, et l'information pertinente du point de vue perceptuel se situe dans la zone spéculaire.

La question de l'accommodation a été posée par [44] : l'observateur accommode-t-il sur la surface même de l'objet, ou sur l'image de la source reflétée par la surface ? Comment cela va-t-il changer sa perception du niveau de brillant de la surface ? S'il est myope, percevra-t-il un niveau de brillant différent de celui qui est perçu par un sujet « normal », du fait de leur accommodation à deux endroits différents ? De plus, on doit garder en tête que notre perception du brillant se fait grâce à nos deux yeux : quelle est l'influence ou le rôle de la vision binoculaire dans la perception du brillant ?

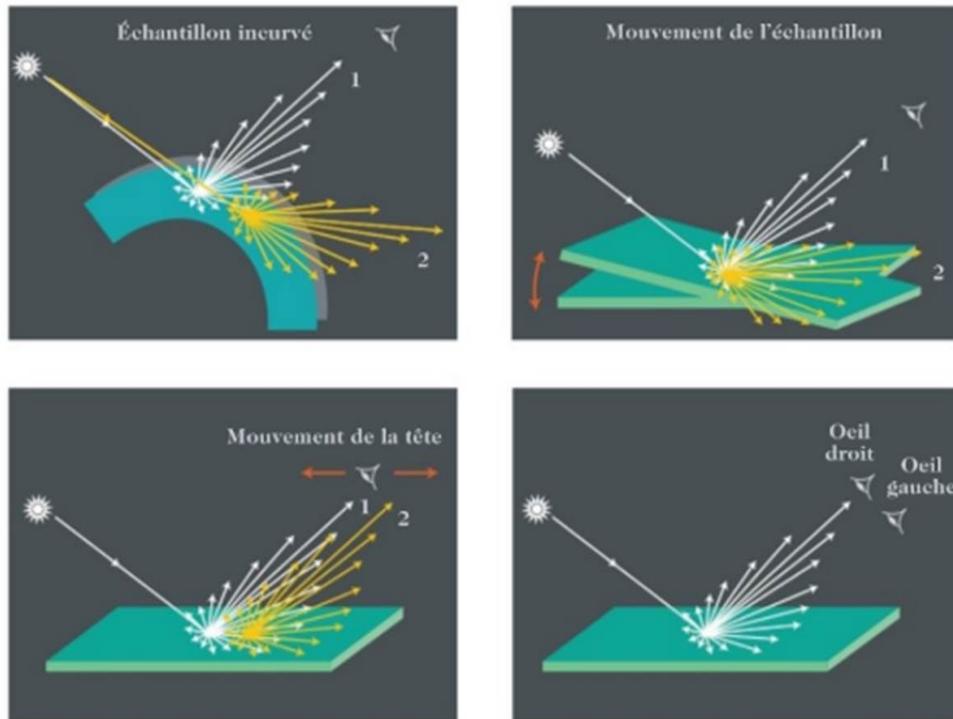


Figure A.2 6 – Percevoir le brillant. Figure extraite de [41].

#### 1.3.4.2 Quantifier la sensation visuelle

En 2004, Obein *et al.* [52] ont montré que la réponse du système visuel n'était pas la même pour toutes les classes de brillant. L'expérience consistait à faire trier des échantillons à un panel d'observateur, de manière à construire un « observateur standard » du brillant. L'échelle était composée de 10 échantillons de papier noir, d'un brillant allant de 1 à 95 GU. Le classement a montré que si les observateurs triaient bien les échantillons (leur classement corrèle avec la mesure du brillant spéculaire), ils accordaient plus de poids aux échantillons très mats ou très brillants, et discriminaient moins facilement les échantillons intermédiaires. Dans la zone des échantillons mats [0 – 25 GU], la pente de la courbe présentée Figure A.2 7 est maximale : l'observateur standard est très sensible aux variations de gloss. Dans la zone des échantillons brillants [60 – 95 GU], la pente est à nouveau très élevée : l'observateur est également sensible aux variations fines de gloss. Dans la zone intermédiaire, la sensibilité est moindre. Judd & Hunter avaient proposé une échelle similaire en 1939 [53].

La relation entre le brillant spéculaire mesuré au glossmètre et le brillant perçu par l'œil n'est donc pas linéaire.

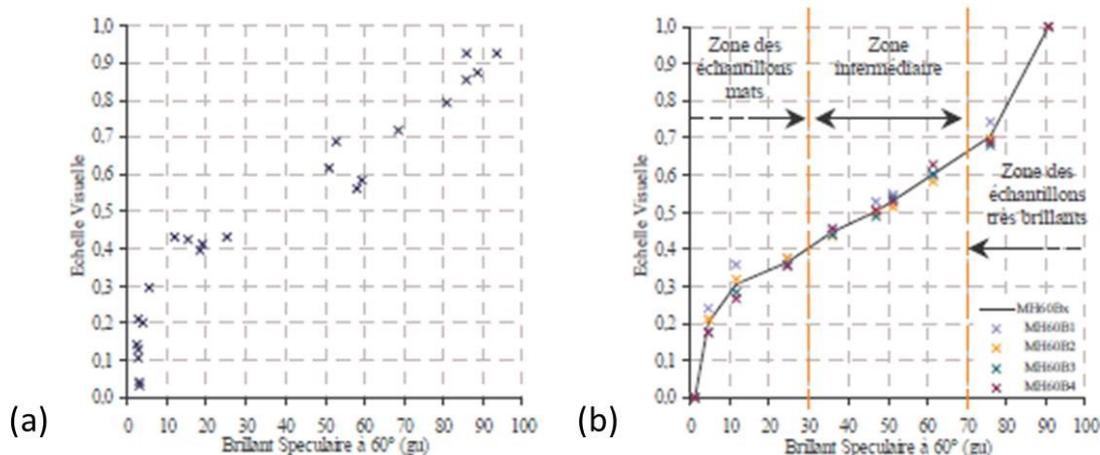


Figure A.2 7 – Sensation visuelle et brillant spéculaire. (a) Echelle issue de Judd & Hunter [53]. (b) Echelle issue de Obein [44].

### 1.3.4.3 Importance de l'éclairage

La source a évidemment une importance non négligeable sur la perception du brillant : elle met en valeur certains effets, ou au contraire les masque, changeant ainsi la sensation visuelle. Dans un article de 2016 [54], les auteurs montraient que la forme de l'éclairage changeait la perception du brillant par un panel d'observateurs ; pour ce faire, des objets simples à différents niveaux de brillant étaient éclairés par une source dont la structure spatiale était modifiée par un jeu de masques, allant de formes simples (cercles, carrés) à des formes plus complexes (fenêtres, ensemble de points, forme aléatoire). Il ressortait qu'un éclairage de forme complexe diminuait le brillant perçu. Ceci est illustré Figure A.2 8.

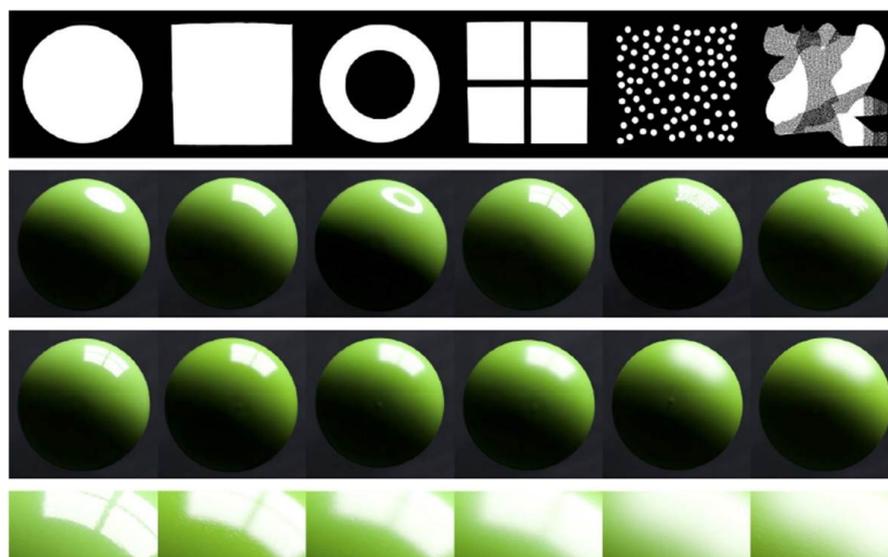


Figure A.2 8 – Masques utilisés et influence sur des objets de même brillant (seconde ligne) ou de brillants différents (deux dernières lignes). Figure extraite de [54].

La convergence de la source a également son importance. En 2010, Leloup *et al.* [55] montrent que la géométrie d'illumination et la distribution de luminance qui en découle influent fortement sur le brillant perçu. Sur six échantillons de verre de même DOI, dont la face arrière était peinte avec des clartés différentes, les auteurs ont modifié le type d'éclairage en jouant sur deux sources, l'une directionnelle et l'autre diffuse, de manière à ce que le contraste entre l'image réfléchi par la surface brillante et ce qui l'entoure puisse être modifié. Il est apparu que des différences nettes étaient perçues par les observateurs, selon le type d'illumination : la distribution de luminance de la scène modifie la perception du brillant.

Les différences dans la perception du brillant dues à l'éclairage auront toute leur importance dans la suite de ce manuscrit.

#### 1.3.4.4 *Constance de brillant*

La constance de brillant est une notion introduite par Obein *et al.* [52]. Les auteurs ont montré que la perception du brillant était indépendante de la direction d'observation. Une constance de couleur existe de la même manière : malgré un changement fréquent d'éclairages au cours d'une même journée, un vêtement rouge reste rouge pour un observateur [32]. Lors de son expérimentation, Obein demande à plusieurs observateurs de classer des échantillons plus ou moins brillants. L'expérience est répétée pour deux configurations angulaires : 20° et 60°. Les échantillons sont classés dans le même ordre pour ces deux configurations. Les géométries d'illumination et d'observation n'ont donc pas d'influence sur la perception visuelle du brillant.

#### 1.3.4.5 *Importance du matériau*

Le matériau en lui-même influe sur la perception du brillant. Selon son indice ou sa rugosité, le pic spéculaire n'aura pas le même aspect, et le brillant perçu diffèrera. La forme et la rugosité influent également sur le brillant perçu. En particulier, la courbure d'un échantillon augmente la sensation de brillant perçue [56]. Kim *et al.* [57] se penchent en 2014 sur l'influence de la rugosité sur le brillant. Ils montrent que la direction des reliefs influe sur le brillant perçu. Pour cela, l'équipe a dû séparer la rugosité réelle des ombrages causés par l'illumination, ce que le cerveau arrive à faire automatiquement. Il ressort de l'étude que la texture d'un échantillon, par les ombrages créés, influent sur la réflexion perçue et donc sur le brillant. Enfin, Hansmann-Roth *et al.* [58] montrent en 2017 que la perception du brillant est influencée par la couleur de la zone périphérique. Le brillant d'une zone claire paraît plus faible quand cette surface claire est placée à côté d'une surface sombre.

#### 1.3.4.6 *« Gestalt »*

Le terme *gestalt* est employé pour la première fois par Harrison et Poulter dans un article de 1951 [59]. Les auteurs entendent par-là que le brillant est une entité globale, unifiée ; sa perception par le système visuel résulte de l'évaluation de plusieurs paramètres à la fois, d'une situation dans son ensemble [32, 60].

#### 1.3.4.7 *Autres sensations visuelles*

Signalons ici l'existence d'autres sensations visuelles liées au brillant, comme le scintillement ou la granulosité, sur lesquelles nous reviendrons dans la suite, et qui ne peuvent être prises en compte par une mesure du brillant spéculaire.

#### 1.3.5 La mesure du brillant dans le contexte de notre étude

Comment alors mesurer le brillant et obtenir une information qui ait un sens, tant d'un point de vue métrologique que perceptuel ? La mesure la plus précise est obtenue via la BRDF, qui caractérise la réflexion lumineuse dans tout l'espace. Mais cette mesure est lente, souvent trop lourde pour être exploitée, et de toute façon inadaptée aux surfaces mates. Nous travaillerons donc au glossmètre, tout en vérifiant nos résultats par des mesures de rugosité. Puisque le brillant d'une surface est dû à la répartition dans l'espace de la lumière après réflexion ou diffusion sur une certaine géométrie, ajouter la caractérisation en rugosité des échantillons à la simple mesure du brillant spéculaire permettra de classer nos surfaces d'une manière plus fiable. La mesure de la rugosité revêt un caractère d'autant plus pertinent que notre étude porte sur les surfaces spécifiquement mates : or nous l'avons dit, l'aspect mat d'un objet est lié à sa rugosité de surface, selon la longueur d'onde considérée. Dans le visible – [380 – 780 nm] – une surface apparaîtra mate dès que ses défauts seront d'un ordre égal ou supérieur à celui de la longueur d'onde : quelques centaines de nanomètres. Bien sûr, toute mesure optique devra être complétée par des tests psycho-visuels.

## 2. Rugosité

Après avoir défini le brillant dans ses deux aspects optique et perceptuel, nous allons à présent définir la rugosité.

### 2.1 Définitions générales

#### 2.1.1 Typologie des défauts d'une surface

Une surface est définie comme la somme d'écarts de différents ordres, chaque ordre correspondant à un type de défauts. A l'échelle macroscopique, on observe des défauts de forme et de position (1<sup>er</sup> ordre), puis de l'**ondulation** périodique (2<sup>nd</sup> ordre). A l'échelle microscopique, on observe une **rugosité** périodique ou pseudopériodique, formée par des stries ou des sillons (3<sup>ème</sup> ordre) et enfin une rugosité apériodique, formée par les arrachements, fentes, piqûres, etc (4<sup>ème</sup> ordre).

#### 2.1.2 Ondulation et rugosité

Dans le langage commun, la rugosité désigne l'ensemble des irrégularités et défauts que présente une surface. En métrologie optique, on la définit plus précisément comme :

« La quantité de défauts d'une surface qui ont une période spatiale petite devant la longueur caractéristique de la surface » [61]

La longueur d'onde spatiale désigne la distance entre les aspérités de la surface. La longueur d'onde de l'ondulation est élevée : il s'agit d'un défaut du 2<sup>nd</sup> ordre à forte amplitude. En revanche, la longueur d'onde de la rugosité est faible. La Figure A.2 9 illustre les notions d'ondulation et de rugosité ainsi que leurs longueurs d'onde.

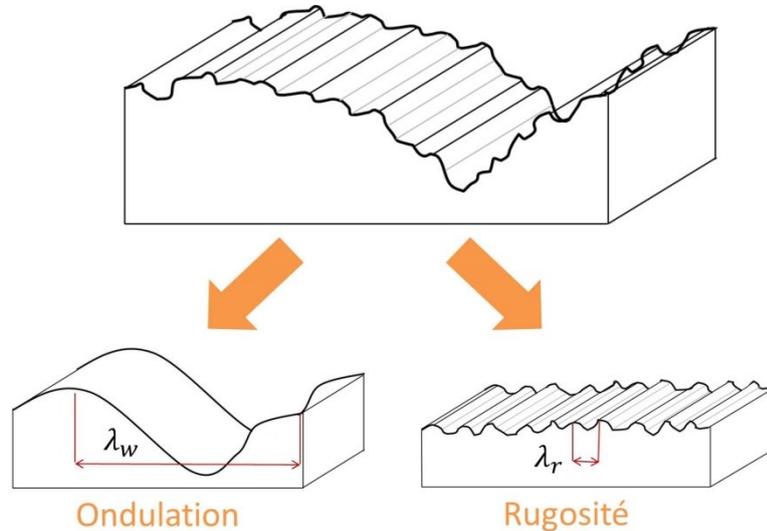


Figure A.2 9 – Ondulation et rugosité. Adapté de [62].

### 2.1.3 Filtrage

Tout l'enjeu consiste, lors du calcul de la rugosité, à séparer correctement l'ondulation de la rugosité. La longueur d'onde de coupure (**cut-off**  $\lambda_c$ ), est définie par l'utilisateur en fonction des cas ; le filtrage supprime les composantes de longueur d'onde supérieure à cette valeur. La rugosité est composée par les basses longueurs d'onde (c'est-à-dire les fréquences spatiales élevées) ; pour supprimer l'ondulation et ne conserver que la rugosité, on utilise donc un filtre passe-bas en longueurs d'onde.

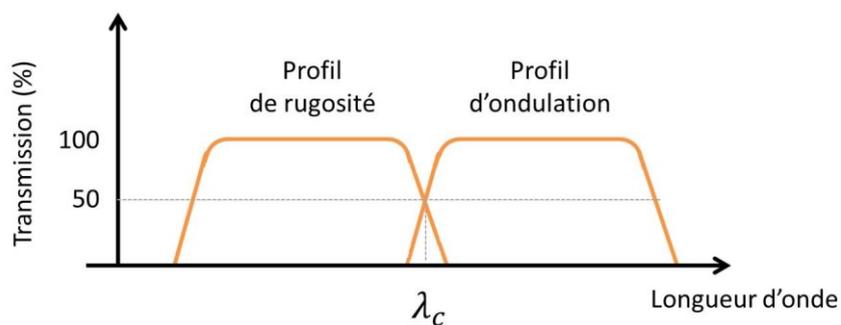


Figure A.2 10 – Principe du filtrage. D'après [63].

Après filtrage du profil initial (dit « primaire », « P »), on obtient un profil de rugosité (*roughness*, « R ») et un profil d'ondulation (*waviness*, « W »). Chacun sert à l'évaluation de ses propres paramètres. On comprend que le choix du cut-off  $\lambda_c$  est crucial : un mauvais cut-off donnera des résultats erronés car il ne prendra pas assez (ou au contraire trop) de

composantes en compte dans la définition des profils de rugosité ou d'ondulation. Cet effet est illustré par la Figure A.2 11.

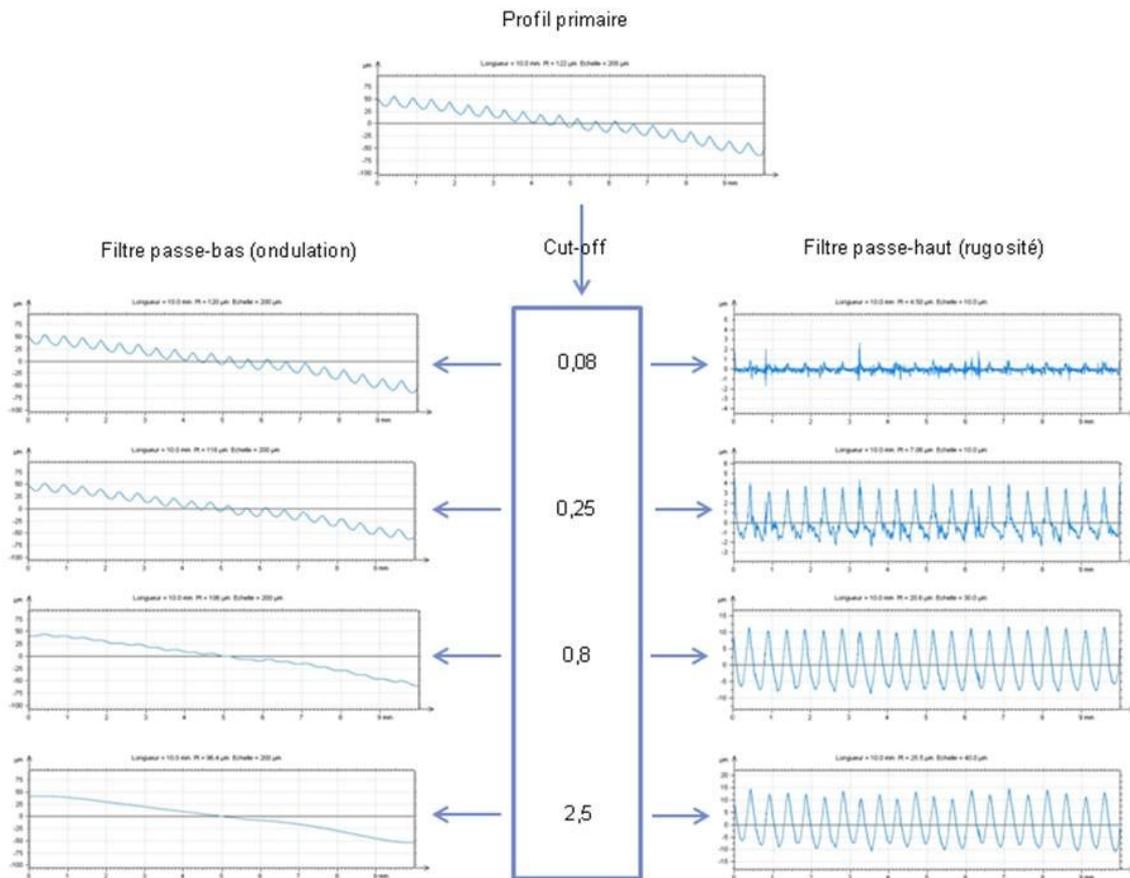


Figure A.2 11 – Effets de différentes valeurs de cut-off sur un même profil. Figure extraite de [64]. Plus la valeur du cut-off augmente, plus l'ondulation tend à « s'écraser » pour ne plus donner que la forme. A l'opposé, la rugosité prend de plus en plus de détails en compte. Il faut décider à quelle échelle on va travailler.

Il existe différents types de filtres : gaussien, double gaussien, gaussien robuste, filtre par splines, filtres morphologiques, filtres par transformée de Fourier<sup>2</sup>... Le filtre gaussien est le filtre par défaut des normes européennes récentes (Spécification géométrique des produits – Etat de surface : Méthode du profil – Caractéristiques métrologiques des filtres à phase correcte ISO 11562 [65], Spécification géométrique des produits – Filtrage – Filtres gaussiens ISO 16610-21 en profil [66] et ISO 16610-61 en surface [67]). Le signal d'entrée est donc transformé par convolution avec une fonction gaussienne. Moins robuste que d'autres filtres, il a néanmoins l'avantage de ne pas déphaser les données.

Précisons que les valeurs de cut-off sont normalisées (ISO 4288) et proposées dans une série géométrique : 0.08 mm, 0.25 mm, 0.8 mm, 2.5 mm, 8 mm, 25 mm...

<sup>2</sup> Pour ces deux derniers types de filtres, qui ne sont pas linéaires, on ne parle pas de cut-off mais de « nesting index ». Pour un filtre morphologique par exemple, le nesting index sera la taille de l'élément structurant.

#### 2.1.4 Normalisation

La rugosité est un paramètre extrêmement normalisé [68] : chaque domaine d'application a sa propre norme, qui détermine les paramètres à calculer, le filtrage à appliquer, la méthode de création des profils et parfois même les conditions de mesure. Sur les instruments « clé en main », qui fournissent une mesure directe des paramètres de rugosité, une différence dans les normes peut causer un écart dans les résultats (c'est typiquement le cas entre un appareil japonais, normalisé en JIS, et un appareil européen). Dans le cadre de notre étude, nous travaillerons en accord avec les normes européennes ISO 4287 [69] et 11562 [65] (pour les profils) et ISO 25178 [70] et 12781 [71] (pour les surfaces). L'ISO 4287 définit les paramètres des profils primaires, d'ondulation et de rugosité, pour un filtrage effectué relativement à l'ISO 11562. De même, l'ISO 25178 définit les paramètres de rugosité surfaciques, relativement à un filtrage effectué conformément à l'ISO 12781.

#### 2.1.5 Paramètres de rugosité

##### 2.1.5.1 *Longueurs et lignes de calcul*

Dans le cas des profils, la rugosité est calculée le long de la **longueur d'évaluation**  $L$ , qui est la longueur totale du profil obtenue après filtrage. A cause de la projection, cette longueur est souvent plus faible que la longueur totale de mesure.  $L$  contient plusieurs **longueurs de base**  $l_i$ , segments sur lesquels sont évaluées les irrégularités du profil.

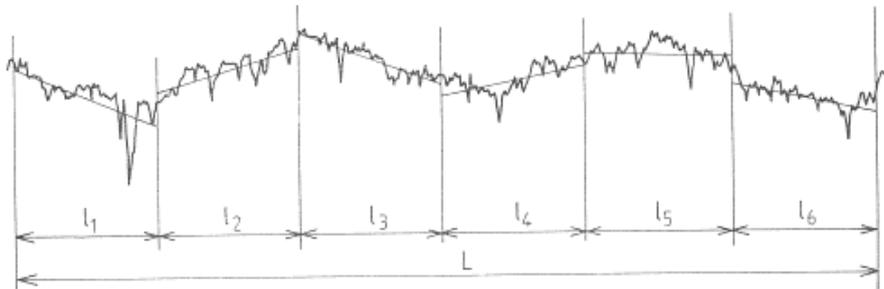


Figure A.2 12 – Longueur d'évaluation  $L$  et longueurs de base  $l_i$ . Source [62].

Les paramètres de rugosité sont évalués sur chaque longueur de base, puis moyennés afin d'éviter les erreurs dues à l'instabilité des instruments de mesure [72]. La longueur de base est égale à la valeur du cut-off. Enfin, notons que la plupart des paramètres de rugosité sont évaluée en fonction d'une ligne de référence fictive qui scinde le profil en deux parties, de façon à ce que la somme des aires situées au-dessus de cette ligne soit égale à la somme des aires situées en dessous. Cette ligne est appelée **ligne moyenne**.

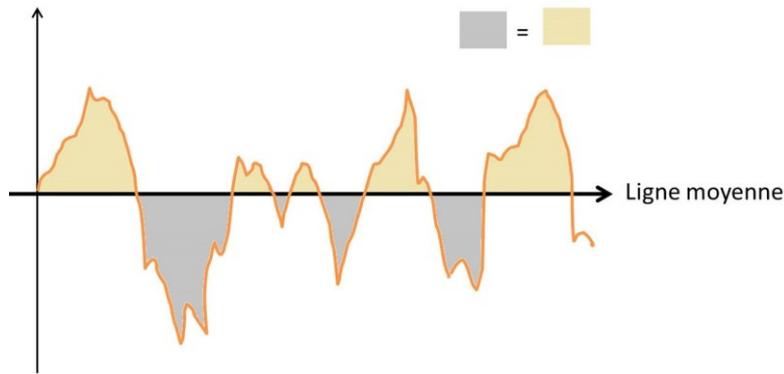


Figure A.2 13 – Ligne moyenne.

### 2.1.5.2 Paramètres de rugosité – cas des profils

Les principaux paramètres de rugosité en profil sont donnés Table A.2 2.

- L'écart arithmétique  $R_a$  est le paramètre le plus largement utilisé dans l'industrie pour classer les échantillons. Il est néanmoins peu pratique car il ne permet pas de discriminer avec certitude les types de profils.

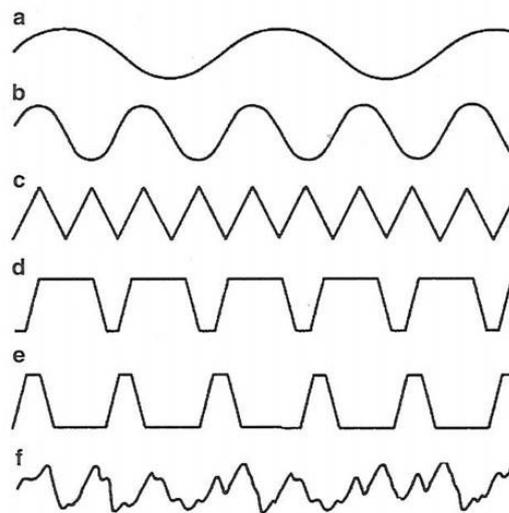


Figure A.2 14 – Exemples de profils très différents mais qui ont la même valeur de  $R_a$  [73].

- L'écart quadratique  $R_q$  est plus sensible que  $R_a$  aux pics et aux vallées, même s'il ne permet pas non plus de discriminer toutes les surfaces (notamment puisqu'il n'accorde aucun poids aux écarts spatiaux).
- L'asymétrie  $R_{sk}$  se réfère à la distribution des hauteurs du profil (Figure A.2 15). Si ce paramètre est nul, la distribution est symétrique ; s'il est négatif, elle est décalée vers le haut, et s'il est positif, elle est décalée vers le bas. En pratique, une surface qui présente des vallées importantes aura un  $R_{sk}$  négatif, tandis qu'une surface avec des pics nombreux aura un  $R_{sk}$  positif.  $R_{sk}$  quantifie donc la symétrie ou non (en amplitude) d'un profil.

Catégorie	Paramètres	Dénomination	Formule	Commentaire
Paramètres d'amplitude	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Moyenne arithmétique des écarts à la moyenne	$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  z_i - \bar{z} $	
	$R_q$ ( $\mu\text{m}$ )	Moyenne quadratique des écarts à la moyenne (R.M.S.)	$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}$	
	$R_{sk}$	Facteur d'asymétrie ( <i>skewness</i> )	$R_{sk} = \frac{1}{nR_q^3} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^3$	calculé à l'intérieur d'une longueur de base.
	$R_{ku}$	Facteur d'aplatissement ( <i>kurtosis</i> )	$R_{ku} = \frac{1}{nR_q^4} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^4$	calculé à l'intérieur d'une longueur de base.
	$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	Hauteur maximale du profil	$R_z = \max_i(z_i) + \min_i(z_i)$	calculé à l'intérieur d'une longueur de base.
Paramètres liés au pas	$RS_m$ ( $\mu\text{m}$ )	Largeur moyenne des éléments du profil	$RS_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m  x_i $	calculé à l'intérieur d'une longueur de base.
	$R_{dq}$ ( $^\circ$ )	Pente quadratique moyenne des points du profil		calculé à l'intérieur d'une longueur de base.
Paramètres liés aux pics	$RP_c$	Peak count : nombre de pics par centimètre, dans un certain seuil.		

Table A.2 2 – Paramètres de rugosités usuels, définis conformément à la norme ISO 4287 dans le cas des profils.

- L'aplatissement  $R_{ku}$  se réfère aussi à la distribution des hauteurs du profil (Figure A.2 15). Une surface parfaitement aléatoire a un facteur d'aplatissement égal à 3 ; si  $R_{ku}$  est inférieur à 3, la surface est majoritairement composée de bosses, tandis que si  $R_{ku}$  est supérieur à 3, la surface est majoritairement composée de pics.

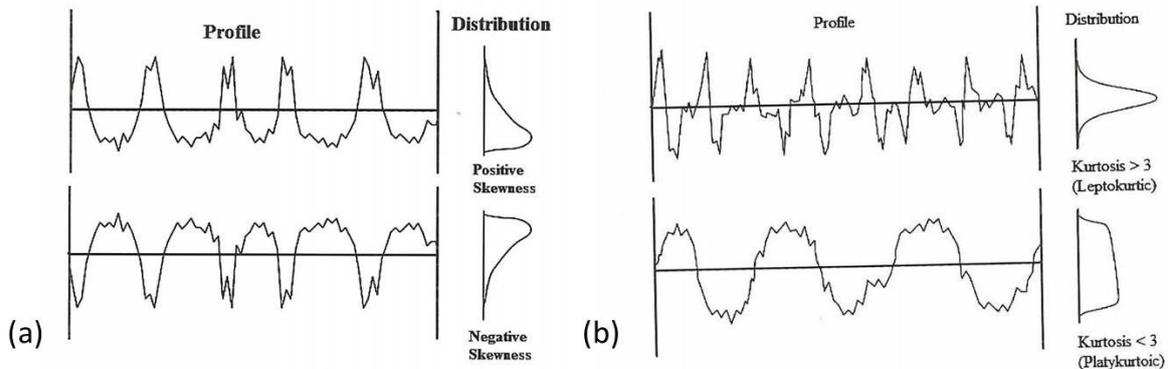


Figure A.2 15 – Aspects des profils selon leur (a) asymétrie ou (b) aplatissement. [73]

### 2.1.5.3 Paramètres de rugosité – cas des surfaces

Le paragraphe précédent traitait des mesures unidimensionnelles. Dans le cas d'acquisitions bidimensionnelles, l'information obtenue est plus importante ; on peut caractériser plus de défauts. La définition des paramètres ne varie pas (à part qu'une seconde dimension est prise en compte), mais d'autres paramètres peuvent être calculés. Nous les donnons Table A.2 3.

- Comme dans le cas des profils, un  $S_{sk}$  négatif indique que la surface est composée en majorité de plateaux et de vallées profondes et fines. Un  $S_{sk}$  positif indique que la surface contient de nombreux pics sur un plan.
- Comme dans le cas des profils, un  $S_{ku}$  supérieur à trois signale une surface composée de pics, et un  $S_{ku}$  inférieur à trois une surface aux reliefs plus mous (bosselée).
- En complément des paramètres d'amplitude, les paramètres spatiaux renseignent sur les caractéristiques latérales des surfaces. La longueur d'autocorrélation  $S_{al}$  renseigne ainsi sur les longueurs d'onde présentes sur la surface. Si  $S_{al}$  est élevé, alors la surface est composée en majorité de longueurs d'onde élevées (basse-fréquence, i.e. surface peu rugueuse). A l'inverse, si  $S_{al}$  est faible, la surface est composée principalement de longueurs d'onde faibles (hautes fréquences, i.e. surface très rugueuse).
- $S_{tr}$  est compris en 0 et 1. S'il est proche de 1, la surface est isotropique : elle a les mêmes caractéristiques dans toutes les directions. S'il est proche de 0, la surface est anisotropique : sa structure est orientée ou périodique.
- $S_{td}$  donne l'angle principal de la structure de la surface.

Catégorie	Paramètres	Dénomination	Formule
Paramètres d'amplitude	$S_q$ ( $\mu\text{m}$ )	Moyenne quadratique (R.M.S.)	$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy}$
	$S_{sk}$	Facteur d'asymétrie ( <i>skewness</i> )	$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[ \frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right]$
	$S_{ku}$	Facteur d'aplatissement ( <i>kurtosis</i> )	$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[ \frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \right]$
Paramètres spatiaux	$S_{al}$ ( $\mu\text{m}$ )	Longueur d'autocorrélation de la surface	$S_{al} = \min_{tx, ty \in \mathbb{R}} \sqrt{tx^2 + ty^2} \text{ avec } \mathbb{R} = \{(tx, ty) : ACF(tx, ty) \leq s\} \text{ et } 0 < s < 1.$
	$S_{tr}$	Rapport texture-aspect de la surface	
	$S_{td}$ ( $^\circ$ )	Directionnalité de la texture	
Paramètres hybrides	$S_{dq}$	Gradient quadratique moyen de la surface	$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[ \left( \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy}$
	$S_{dr}$ (%)	Aire développée	$S_{dr} = \frac{1}{A} \left[ \iint_A \left( \sqrt{\left[ 1 + \left( \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2} \right) - 1 \right) dx dy \right]$

Table A.2 3 – Paramètres de rugosités usuels, définis conformément aux normes ISO 25178 dans le cas des surfaces.

- Les paramètres hybrides quantifient l'information sur les trois axes, X, Y et Z. Ils prennent ainsi en compte un grand nombre d'informations (pentes, courbures, ...).  $S_{dq}$  représente ainsi la pente quadratique moyenne de la surface, tandis que  $S_{dr}$  renseigne sur la complexité de la surface. Si  $S_{dr}$  est proche de 0%, la surface est complètement plate ; sinon, la surface est plus complexe.
- Signalons également l'existence de paramètres fonctionnels, basés sur l'analyse de la courbe de portance (courbe d'Abbott-Firestone), elle-même obtenue par intégration de la distribution de la hauteur sur toute la surface, et de paramètres fonctionnels de volume, utilisés en tribologie. Les paramètres de fonction, calculés à partir de la segmentation de la surface en motifs, existent également.

#### 2.1.5.4 Intérêt et limite des paramètres de rugosité

L'intérêt majeur des paramètres de rugosité est qu'ils sont relativement simples à calculer (ce qui est d'autant plus vrai avec un logiciel de métrologie adapté, comme Mountains Map™ développé par Digital Surf™) et permettent une quantification rapide des aspects de surface. Néanmoins, nous l'avons mentionné, un paramètre seul ne peut caractériser entièrement une surface ; pire, deux surfaces très différentes peuvent avoir le même paramètre. On ne peut donc que regarder un ensemble de paramètres choisis en fonction de l'étude.

#### 2.1.5.5 Autocorrélation

L'autocorrélation consiste en la comparaison d'un étudiable avec lui-même, translaté. Cette opération est utilisée pour déterminer si le signal est périodique ou non. L'autocorrélation représente donc la similitude de la surface avec elle-même. On peut classer ainsi les surfaces selon qu'elles sont anisotropes, isotropes ou périodiques.

On écrit la **fonction d'autocorrélation** comme :

$$G(\tau) = \frac{\lim_{L \rightarrow \infty} \int_0^L z(x)z(x + \tau)dx}{R_q^2}$$

où  $\tau$  est le décalage imposée à l'un des deux signaux par rapport à l'autre et  $L$  la longueur d'évaluation [73]. Pour  $j = 0$ , c'est-à-dire pas de décalage, on a  $G(x_0) = G(0) = R_q^2$ .

Notons qu'en optique, la **longueur de corrélation** est la plupart du temps notée  $\sigma$ . Elle correspond au paramètre  $S_{al}$  de la norme ISO 25178 défini plus haut.  $\sigma$  est la distance moyenne entre deux motifs d'aspérités, définie telle que 10% de la fonction d'autocorrélation intercepte la courbe en  $2.3 \times \sigma$ . La fonction d'autocorrélation s'écrit alors comme :  $G(\tau) = e^{-\tau/\sigma}$ . Elle est tracée Figure A.2 16.

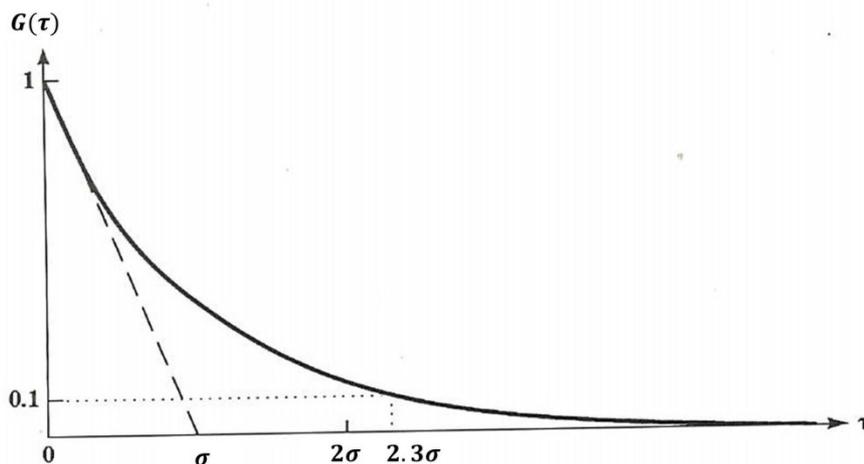


Figure A.2 16 – Fonction et longueur d'autocorrélation, adapté de [73].

### 2.1.5.6 Analyse spectrale

L'analyse spectrale d'un profil ou d'une surface est utilisée pour caractériser la périodicité de motifs sur l'échantillon analysé, ou encore l'orientation des structures présentes sur la surface. On obtient le spectre de l'étudiable en calculant la transformée de Fourier de la mesure. La **densité spectrale de puissance** (DSP) peut ensuite être calculée grâce au théorème de Wiener-Kintchine en faisant la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation :

$$DSP(f) = TF|G(x)|$$

On remonte alors à la rugosité quadratique par la formule :

$$R_q^2 = \int_{k=0}^{k=+\infty} |DSP(k)|^2 2\pi k dk$$

où  $k$  est la fréquence spatiale [74].

## 2.2 Diffusion et rugosité

### 2.2.1 Cas des surfaces peu rugueuses

La théorie de la diffusion de la lumière permet de faire le lien entre rugosité de surface et lumière diffusée par une surface. Les formules que nous indiquons ici sont valables dans le cas des surfaces homogènes, isotropes et peu rugueuses, c'est-à-dire telles que  $R_q \ll \lambda/\cos(\theta_i)$ . La formule suivante donne le lien entre lumière diffusée et rugosité :

$$\frac{d\phi}{\phi_i d\Omega} = \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \frac{1}{\cos(\theta_i)} |w_{ii}|^2 |DSP(\Delta k)|^2$$

avec

$$|\vec{\Delta k}| = \Delta k = \left| \frac{2\pi}{\lambda} (\sin(\theta_i) - \sin(\theta)) \right|$$

et

- $\lambda$  la longueur d'onde du faisceau incident ;
- $\theta_i$  l'angle d'incidence ;
- $\theta$  l'angle d'observation ;
- $\phi_i$  le flux incident ;
- $\frac{d\phi}{d\Omega}$  le flux diffusé par unité d'angle solide dans la direction d'observation ;
- $\vec{\Delta k}$  l'écart entre les projections des vecteurs d'onde des rayonnements incident et diffusé.
- $w_{ii}$  est un facteur optique qui dépend de la polarisation du flux incident, des angles d'incidence et d'observation, et de la permittivité du matériau considéré. Son expression complète est donnée par [75].

On voit qu'en mesurant la lumière diffusée dans l'espace, par exemple au moyen d'un rugosimètre optique comme celui utilisé par Silvestri dans son travail de thèse [69], on peut connaître la densité spectrale de puissance :

$$|DSP(\Delta k)|^2 = 4 \times \frac{d\phi}{\phi_i d\Omega} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \frac{\cos(\theta_i)}{|w_{ii}|^2}$$

A l'inverse, en connaissant la densité spectrale de puissance, on peut aussi prévoir l'allure de la répartition angulaire de la lumière diffusée.

En 2002, Deumié *et al.* [76, 41] ont utilisé l'ellipsométrie optique pour mesurer la BRDF d'échantillons de différentes rugosités, faibles. La diffusion globale s'écrit en intégrant l'intensité diffusée sur tout l'espace :

$$D = \int I(\theta, \phi) d\theta d\phi$$

Les auteurs définissent ensuite le *T.I.S* (Total Integrated Scattering) comme :

$$T.I.S. = \frac{D}{R}$$

Où  $R$  est le coefficient de réflexion de Fresnel d'un échantillon de même matériau, plan. Le *T.I.S* s'écrit pour une surface très peu rugueuse comme :

$$T.I.S. = \left( \frac{4\pi R_q \cos\theta_i}{\lambda} \right)^2$$

Connaitre la diffusion dans l'espace permet de trouver la rugosité R.M.S d'une surface ; à l'inverse, connaitre la rugosité R.M.S d'une surface permet de prédire sa diffusion de la lumière.

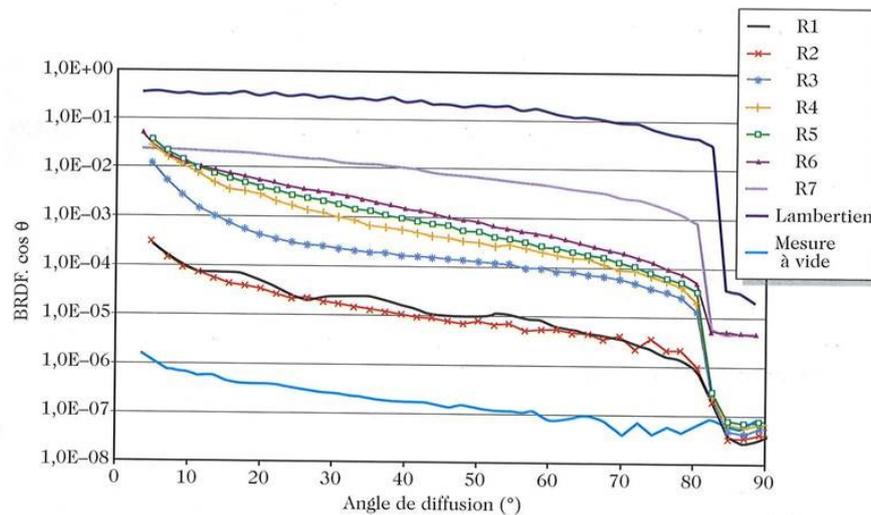


Figure A.2 17 – Diffusion en fonction d'un angle pour plusieurs surfaces, composées du même matériau, mais de rugosité différentes [76, 41]. La surface lambertienne est logiquement la plus diffusante. Les autres surfaces s'échelonnent selon leur rugosité, des moins rugueuses (R1, R2) aux plus rugueuses (R6, R7). On reste dans le cas des surfaces peu rugueuses :  $R_q \ll \lambda / \cos(\theta_i)$ .

### 2.2.2 Cas des surfaces rugueuses

Lorsque la surface est très rugueuse, lorsque la rugosité est de l'ordre de ou supérieure à la longueur d'onde, d'autres modèles doivent être mis en place. Ils sont cités par [41]. Nous décrivons ici brièvement les modèles mis en place, pour une surface aléatoire définie par sa rugosité R.M.S.  $R_q$  et par ses longueurs de corrélation  $\sigma$  (supposée identique dans les deux directions  $x$  et  $y$  – cas d'une surface isotrope). La surface est supposée gaussienne, et le plan tangent en chaque point de la surface peut être défini, d'angle  $\theta_N$  entre sa normale et la normale au plan moyen, de sorte que :

$$\langle \tan^2 \theta_N \rangle = 2 \left( \frac{R_q}{\sigma} \right)^2$$

Les effets d'ombrage ne sont pas pris en compte. La surface peut être décomposée en une série de micro-facettes ; la densité de probabilité des pentes  $P_N(\theta_N)$  des micro-facettes de la surface est reliée aux flux diffusés par la surface [77]. Dans le cadre de l'approximation de Kirchhoff ( $R_q \gg \lambda$ ), la luminance rétro-diffusée sous l'angle  $\theta$  s'écrit pour un matériau d'indice  $n$  :

$$L(\theta) = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \frac{L_{max} P_N(\theta)}{\cos^2(\theta)}$$

En mesurant les variations de luminance, on peut ainsi trouver la densité de probabilité des pentes. A l'inverse, si l'on connaît la densité de probabilité des pentes d'une surface (à partir d'une mesure de rugosité par exemple), on peut prédire le flux diffusé dans l'espace. Les détails de ce type de mesures et les approximations en jeu sont décrites par [41].

### 2.2.3 Influence de la rugosité sur la couleur

En 2003, Simonot *et al.* [78] appliquent l'approximation de Kirchhoff à des surfaces aléatoires « réelles », c'est-à-dire dont la rugosité est du même ordre de grandeur que celle d'une peinture, d'un papier ou d'un textile. Les auteurs arrivent aux conclusions suivantes :

- Plus la surface devient rugueuse, plus sa clarté augmente. Cet effet est d'autant plus vrai que la clarté de la surface initiale est faible (surface sombre). Ainsi, une surface colorée qui subit un changement de rugosité comme des craquelures ou des microfissurations va blanchir (cas des chancis de vernis).
- Plus la surface devient rugueuse, plus sa saturation<sup>3</sup> diminue. Cet effet est d'autant plus vrai que la clarté de la surface initiale est importante (surface claire). La couleur se désature quand la rugosité de surface augmente.
- La teinte<sup>4</sup> n'est pas affectée.
- L'écart de couleur est très vite perceptible par l'œil humain : une modification de l'état coloré d'une surface est perçue dès que le rapport  $\frac{R_q}{\sigma}$  est supérieur ou égal à 0.12.

## 2.3 Instrumentation

De nombreux dispositifs existent pour la mesure de la rugosité. On peut les classer en deux catégories : les profilomètres tactiles, et les profilomètres optiques sans contact. Il est évident que dans le cadre de notre étude, les profilomètres avec contact, comme le rugosimètre à stylet, ne sont pas envisageables : une pointe fine vient toucher la surface, ce qui ne doit en aucun cas être fait sur un objet du patrimoine. Nous décrivons ci-après quelques instruments sans contact.

---

<sup>3</sup> La saturation  $C$  ou chroma vaut  $C = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})}$  pour une couleur de coordonnées  $L^*$ ,  $a^*$  et  $b^*$  dans l'espace CIELab.

<sup>4</sup> La teinte vaut  $h = \tan^{-1}(b^*/a^*)$ .

### 2.3.1 Procédés

Le **rugosimètre optique** de la Table A.2 4 est décrit dans [74, 75]. Il permet de remonter à la rugosité de surface via la mesure de la diffusion lumineuse. Il est adapté aux très faibles rugosité ( $R_q \ll \lambda$ ). Le microscope à force atomique (*Atomic Force Microscopy*, **AFM**) mesure les forces atomiques en jeu entre la surface d'un objet et la sonde. Lorsque la sonde est proche de la surface, les interactions de Van der Waals entre les atomes de la pointe et ceux de la surface créent une légère déflexion du bras du capteur ; la mesure de cette déflexion permet de remonter à la rugosité de la surface. L'AFM est l'un des procédés les plus précis qui existe actuellement, mais elle ne peut être utilisée que pour mesurer des rugosités très fines, sur de petites surfaces. Les **techniques interférométriques** donnent une image de la rugosité par comparaison de l'étudiable avec un plan de référence. Toutes ces techniques, aussi précises qu'elles soient, ne permettent ni de faire de grande cartographies, ni de visualiser une rugosité élevée. Leur champ d'action est restreint aux faibles rugosités. Dans le cadre de notre étude sur les objets mats, et donc de rugosité relativement élevée, nous avons besoin d'un instrument qui soit capable de visualiser des rugosités variées. Nous choisissons le **microscope confocal à codage chromatique**, décrit ci-après.

Instrument	Rugosimètre optique « Angle resolved scattering »	Interféromètre	Microscope à force atomique	Microscope confocal à codage chromatique
Résolution latérale	0.1 nm	0.5 $\mu\text{m}$	~ 10 nm	[0.1 nm ; 1 $\mu\text{m}$ ]
Résolution verticale	0.1 nm	1 nm	~ 0.1 nm	10 nm
Surface analysée	~ 1 $\text{mm}^2$	100 $\mu\text{m}^2$ à 1 $\text{mm}^2$	100 $\text{nm}^2$ à 150 $\mu\text{m}^2$	1 $\text{mm}^2$ à 20 $\text{cm}^2$
Longueur d'onde	633 nm	1064 nm pour une source YAG		[380 – 780 nm]

Table A.2 4 – Tableau comparatifs de différentes techniques de mesure de la rugosité. Inspiré de [74].

### 2.3.2 Microscopie confocale à codage chromatique

Le microscope confocal à codage chromatique (simplement désigné dans la suite « station de microtopographie ») a été développé par la société STIL<sup>TM</sup>. Il est composé d'une source de lumière blanche, reliée par fibre optique à une sonde optique. La sonde contient un objectif chromatique qui décompose la lumière blanche en ses multiples longueurs d'onde. Chaque faisceau monochromatique va frapper l'axe Z à une distance connue [79].

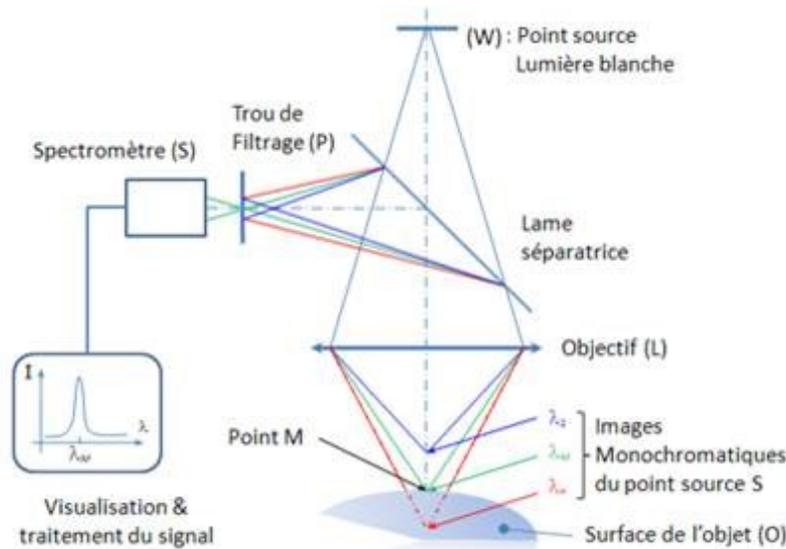


Figure A.2 18 – Principe du microscope confocal à codage chromatique. [79]

On positionne alors un objet dans la zone de mesure. Une seule longueur d'onde sera réfléchiée spéculairement à sa surface, renvoyée vers la sonde et vers un spectromètre pour analyse (les autres longueurs d'onde sont filtrées – principe confocal). Le spectromètre examine alors le faisceau qui nous intéresse : sa longueur d'onde est liée à la hauteur du point analysé.

En exploitant astucieusement le chromatisme axial, habituellement considéré comme un défaut optique, les sondes permettent une cartographie fine des surfaces, sans déplacement de la sonde en Z au cours de la mesure.

Le ratio signal sur bruit de ce microscope est très bon : les spectres sont très peu bruités, ce qui rend possible la mesure en environnement éclairé. L'information en hauteur est obtenue sans déplacement de la platine en Z au cours de la mesure, ce qui évite les artefacts mécaniques au cours de l'acquisition. La résolution verticale de la sonde est théoriquement de l'ordre de  $0,01 \mu\text{m}$  en Z. La résolution latérale de l'appareil dépend du pas mécanique de translation en X et Y. Elle valait  $0.156 \mu\text{m}$  pour la station de microtopographie n°1, et  $0.999 \mu\text{m}$  pour la station n°2<sup>5</sup>.

La sonde de mesure doit être choisie en fonction de la surface à analyser. Les rugosités élevées ou les surfaces présentant des écarts de forme importants devront être mesurés avec le crayon optique 8 mm, tandis que les faibles rugosités ou les surfaces planes seront mesurées avec le crayon optique 600  $\mu\text{m}$ . D'autres crayons (300  $\mu\text{m}$ , 1 mm et 3 mm) complètent l'instrumentation.

<sup>5</sup> Le C2RMF possède deux stations de microtopographie. La plus ancienne (station n°1, STIL™ CHN-150) a la meilleure résolution latérale –  $0.156 \text{ nm}$  – mais l'état de ses sondes et de son spectromètre nous a contraints à la remplacer en 2017 par la station n°2 (Altimet™) puis par la station n°3, moins précise latéralement. Voir Annexe A.2.2.

### 2.3.3 Avantages et inconvénients de cette technologie

La microscopie confocale à codage chromatique telle qu'elle est présentée par Stil™ a les avantages suivants :

- Pas de réelle limite haute sur la taille des cartographies. Des surfaces de 10 cm<sup>2</sup> peuvent être scannées aussi bien que des surfaces de 50 μm<sup>2</sup>.
- Des surfaces de rugosités très différentes peuvent être scannées : il suffit d'adapter le capteur à la rugosité de l'objet considéré. La résolution verticale reste très satisfaisante.
- Le réglage de l'intensité lumineuse et de la fréquence d'échantillonnage permet de cartographier aussi bien des surfaces très réfléchissantes que des surfaces très sombres.

On peut citer les inconvénients suivants :

- Les cartographies sont extrêmement longues. Il faut compter 1h30 pour scanner 1 mm<sup>2</sup> à la meilleure résolution latérale. Et 10h pour scanner 20 x 10 cm<sup>2</sup> au pas en X et Y de 5 μm...
- L'instrument est limité en fréquences spatiales et n'est donc pas adapté aux surfaces de très faible rugosité.

Les détails accessibles via le microscope confocal vont de 1 μm à plusieurs dizaines de millimètres, ce qui signifie que le microscope est sensible à la texture visible par un observateur humain (l'œil pouvant discerner au mieux des détails de 148 μm à une distance d'observation de 50 cm). On considère donc que le microscope confocal à codage chromatique est adapté à notre étude.

## 3. Reproduire l'apparence

Nous l'avons dit en introduction : notre étude porte sur la pertinence de l'impression relief, ou « 2.5D », pour la reproduction de matériaux réalistes. Dans ce dernier paragraphe, nous présentons donc les études déjà réalisées pour la reproduction de matériaux, à la fois en simulation (Computer Graphics) et en impression.

### 3.1 Simuler l'apparence grâce à la rugosité

De nombreux modèles ont été développés pour simuler l'apparence d'une surface de manière numérique. Cook & Torrance [80, 81] développent dans les années 80 un modèle de réflectance pour l'infographie basé sur la décomposition d'une surface en une succession de micro-facettes, où chaque micro-facette est supposée plane. La BRDF mise en œuvre dans ce modèle s'écrit alors :

$$f_R(\theta_r, \varphi_r, \theta_i, \varphi_i) = \frac{D(\theta_h)G(\theta_i, \theta_r)R(\theta'_i)}{4\cos\theta_i\cos\theta_r}$$

où

$\theta_i, \varphi_i$  sont les coordonnées sphériques du faisceau incident ;

$\theta_r, \varphi_r$  les coordonnées sphériques du faisceau réfléchi ;

$\theta'_i$  l'angle formé entre le rayon incident et la normale à une facette ;

$\theta_h$  l'angle formé entre la normale à la surface moyenne et la normale à une facette ;  
 $D(\theta_h)$  une fonction de distribution des pentes ;  
 $m$  est un paramètre de rugosité (pente R.M.S. des facettes) ;  
 $G(\theta_i, \theta_r)$  est une fonction d'ombrage ;  
 $R(\theta'_i)$  la reflectance de Fresnel.

Grâce au modèle de Cook-Torrance, différents types de surfaces peuvent être modélisées, brillantes ou mates, comme le montre la Figure A.2 19.

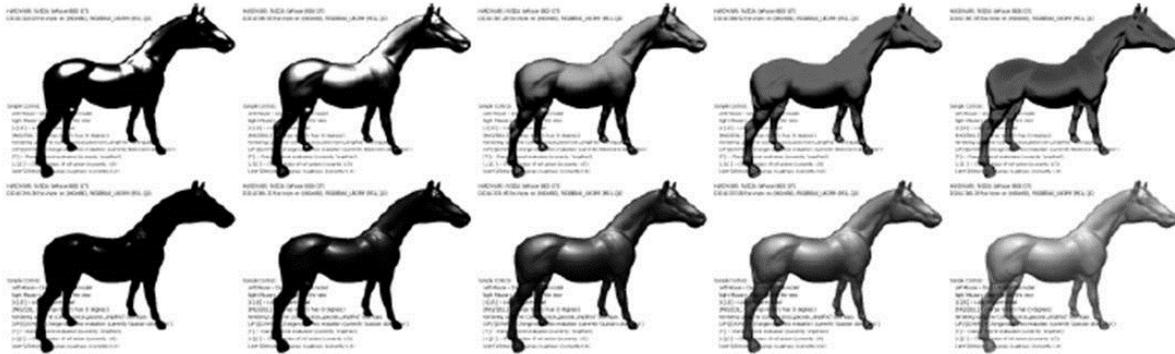


Figure A.2 19 – Surfaces modélisées grâce au modèle de Cook-Torrance [82].

Le premier modèle uniquement dédiée au rendu de surfaces mates est celui proposé par Oren & Nayar en 1994 [83]. Ce modèle prend en compte les phénomènes d'ombrage et d'inter-réflexions causés par la rugosité de surface. Le modèle d'Oren-Nayar est adapté aux surfaces rugueuses et diffuses ; chaque micro-facette du modèle est considérée comme lambertienne, à la différence du modèle de Cook-Torrance, où chaque facette présente uniquement de la réflexion spéculaire. La luminance réfléchie s'écrit alors :

$$L_r = \frac{\rho}{\pi} \cos\theta_i \times (A + (B \times \max[0, \cos(\varphi_i - \varphi_r)] \times \sin\alpha \times \tan\beta)) \times E_0$$

avec

$E_0$  l'éclairement reçu par les micro-facettes ;

$\rho$  l'albedo de la surface ;

$$A = 1 - 0.5 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.33} ;$$

$$B = 0.45 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09} ;$$

$$\alpha = \max(\theta_i, \theta_r) ;$$

$$\beta = \min(\theta_i, \theta_r) ;$$

$\sigma$  la rugosité de la surface (déviations standard des pentes). La distribution en micro-facettes suit un modèle gaussien, dont  $\sigma^2$  est la variance. La valeur de la rugosité est la clé de la finesse du modèle.

Un exemple de résultats est donné Figure A.2 20.



Figure A.2 20 – Image réelle et sa simulation selon un modèle lambertien simple et selon le modèle d’Oren-Nayar. Le modèle d’Oren-Nayar représente de manière bien plus exacte la réflexion diffuse due à la rugosité de surface. [83]

Ashikhmin *et al.* [84] raffine un peu ce modèle en 2000 et crée des BRDF adaptées à différentes distribution de micro-facettes. Le terme d’ombrage utilisé par les auteurs permet une meilleure représentation des surfaces. Leur modèle est plus particulièrement adapté aux surfaces qui présentent de la réflexion spéculaire.

Simonot [85] présente en 2009 un modèle qui fait le lien entre les précédents. Le modèle de Simonot prend en compte n’importe quel type de distribution de pentes, simulée ou issue d’une mesure topographique, et peut prendre en compte les effets d’ombrage et d’inter-réflexions. Les cas lambertiens et les modèles de Cook-Torrance ou d’Oren-Nayar deviennent des cas particuliers du modèle de Simonot.

### 3.2 Imprimer l’apparence

En 2009, Weyrich *et al.* [86] proposent une méthode pour recréer une certaine réflectance. Une BRDF est spécifiée en entrée du système via une interface graphique, puis une surface composée de micro-facettes est créée et optimisée pour produire précisément cette BRDF. Les auteurs ont envisagé cette conversion de la BRDF en une distribution de micro-facettes comme un problème de déconvolution inverse. Les micro-facettes sont ensuite traduites en cartographie des hauteurs, de manière à être lues et usinées sur une surface métallique à l’aide d’une fraiseuse.

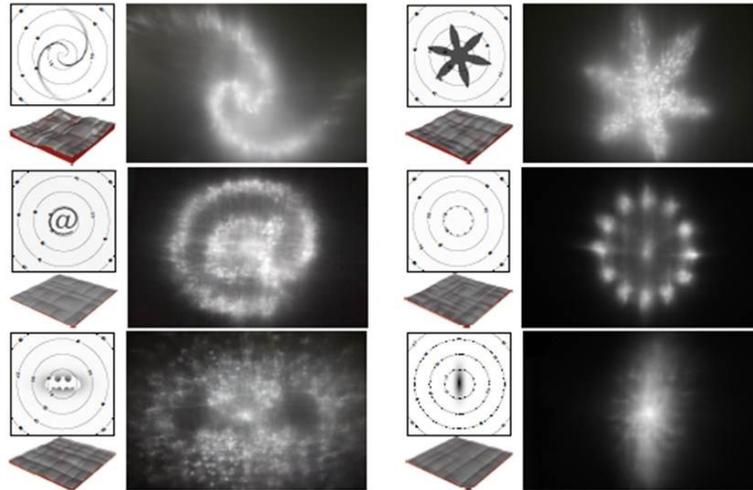


Figure A.2 21 – Divers exemples issus de [86]. Réflectance souhaitée par l'utilisateur, micro-facettes équivalentes et photographie de la réflexion produite sous éclairage directionnel.

Si cette étude n'a pas permis de reproduire des matériaux réels, elle a néanmoins ouvert la voie en montrant qu'il était possible d'imprimer une certaine BRDF.

Toujours en 2009, Matusik *et al.* [87] impriment des objets dont la réflectance de surface n'est pas uniforme. Leur démarche avait pour but d'augmenter les possibilités d'une imprimante, en rendant possible l'impression d'objets aux aspects de surface variés. Leur procédé repose non pas sur la création d'une distribution adéquate de micro-facettes, mais sur la connaissance des BRDF de chacune des encres du système et de leurs combinaisons. Un point notable est que les auteurs utilisent le procédé de demi-ton pour modifier la BRDF de l'encre, sans souci de la couleur. Au lieu de proposer une gamme de couleurs accessibles, le procédé décrit par les auteurs propose une gamme de matériaux reproductibles. Plusieurs couches d'encres sont superposées, chacune avec son propre schéma de demi-ton. Des encres métalliques sont éventuellement ajoutées. On obtient ainsi une image imprimée en couleur qui présente des variations de BRDF.

Hašan *et al.* [88] utilisent une imprimante 3D multi-matériaux pour modifier les propriétés de diffusion des objets imprimés. Une gamme de matériaux de propriétés connues est disponible pour l'impression ; ils peuvent être combinés pour former de nouveaux aspects de surface. A la différence des articles précédents, cette étude prend en compte les phénomènes de diffusion dans les couches externes du matériau, à travers la BSSRDF (*Bi-directional Scattering-surface reflectance distribution function* [89]), version étendue de la BRDF, et vise à reproduire des matériaux opaques ou semi-transparents. Les auteurs produisent ainsi des surfaces d'apparence proche de celle du marbre ou de la pierre. La couleur n'est pas prise en compte. Signalons les travaux de Dong [90] dont l'équipe a également réussi à recréer des matières opaques et translucides, en utilisant une fraiseuse et une imprimante 3D.

En 2012, Malzbender *et al.* [91] impriment à leur tour des réflectances en jouant sur le demi-ton de l'encre et la structure géométrique de cavités métalliques placées sous la couche

d'impression. Une couche transparente est utilisée comme masque pour bloquer une partie du flux spéculaire dû à la sous-couche métallique.

En 2013, Lan *et al.* [92] vont plus loin et proposent un protocole pour reproduire l'apparence totale des matériaux en combinant deux procédés d'impression : l'impression 3D pour créer une distribution de micro-facettes et l'impression 2D pour ajouter l'information en couleurs. On donne une réflectance complexe en entrée, à partir de laquelle une distribution de micro-facettes va être créée. Les micro-facettes sont corrigées pour prendre en compte les effets d'ombrage et optimisées pour que la surface imprimée corresponde à la surface désirée ; la surface résultante est imprimée en 3D puis recouverte d'une couche colorée par une imprimante couleur traditionnelle. Ce procédé permet d'étendre largement la gamme de matériaux imprimables en 3D et en 2D, en combinant les deux techniques. Soulignons tout de même qu'aucun des objets présentés dans l'article n'a une apparence mate et que le but des auteurs était de fabriquer des objets de réflectivité complexe, non de reproduire des matériaux.

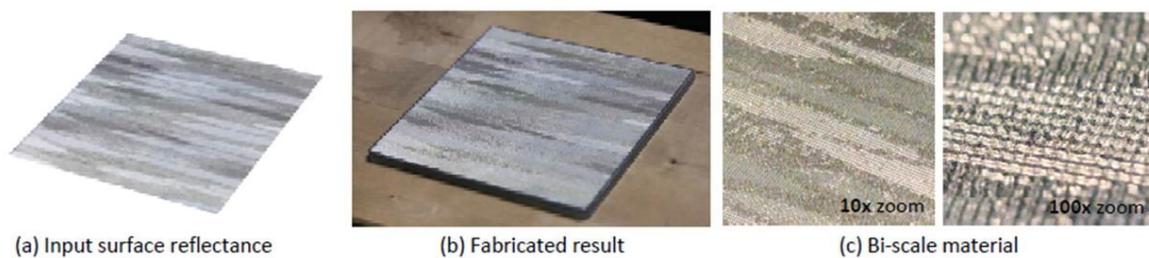


Figure A.2 22 – Réflectance d'entrée et réflectance de sortie. Figure extraite de [92].

## 4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dans un premier temps défini les aspects de brillant : nous avons vu qu'il était à la fois une conséquence physique de la répartition de la lumière et un attribut analysé de manière cognitive par notre cerveau. En conséquence, le brillant est complexe à appréhender par son double aspect optique – perception. Néanmoins, le fait que l'œil humain soit particulièrement sensible dans la gamme des mats à de légères variations de brillant renforce l'intérêt de notre étude : arriver à « faire du mat » est un réel gage de qualité du produit.

Il est certain que la seule mesure du brillant spéculaire ne suffit pas à caractériser l'aspect brillant d'une surface. Néanmoins, cette évaluation reste la norme dans l'industrie, et la première mesure à faire : nous conservons donc l'évaluation au glossmètre du brillant spéculaire pour effectuer un classement des surfaces imprimées. A cette mesure, nous choisissons d'ajouter systématiquement la mesure de rugosité pour caractériser géométriquement les surfaces, ainsi que dans certains cas, une mesure simplifiée de la BRDF. Nous avons vu dans ce chapitre que connaître la rugosité d'une surface permettait de prédire sa BRDF ; rugosité et réflexion lumineuse sont liées.



## PARTIE B

# Optimisation des performances d'un système d'impression en relief



## Partie B – Optimisation des performances d’un système d’impression en relief : faire du mat

Dans la Partie A, nous avons vu qu’il y avait un réel intérêt pour les industriels à « faire du mat », en grande partie parce que les aspects de surface mats sont aujourd’hui valorisés : ils donnent un cachet réaliste à l’objet considéré, même si leur apparence est le produit d’une fabrication synthétique. Pour notre étude, nous nous sommes placés dans le cadre de la conservation – restauration du patrimoine : nous espérons donc produire au moyen d’un système d’impression en relief des objets ou parties d’objets qui ressembleraient à des matériaux naturels, souvent anciens.

La technologie d’impression choisie à cette fin est dite « 2.5D ». Le chapitre B.1 la présente, en donne ses paramètres clés ainsi que leur influence sur le brillant des surfaces. Le chapitre B.2 est consacré à la présentation d’une méthode d’analyse des hauteurs imprimées. Le chapitre B.3 traite spécifiquement de la réduction et du contrôle des effets de brillant via la création de microstructures adaptées ; une section est consacrée à la définition et à l’étude du léger scintillement des surfaces ainsi produites. Enfin, le chapitre B.4 place notre travail sur le brillant dans un algorithme de gestion des couleurs plus général et aboutit à l’uniformisation des niveaux de brillant colorés.



## Chapitre B.1. L'impression en relief

L'impression en relief développée par l'entreprise Océ Print Logic Technologies permet la recréation de reliefs, de structures et de couleurs avec une précision et une qualité tout à fait intéressantes, ce qui rend envisageable la reproduction de matériaux. Quel est ce procédé, comment fonctionne-t-il et en quoi se différencie-t-il des autres procédés 3D ?

Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur les paramètres d'impression et étudierons leur influence sur la rugosité et le brillant de surfaces simples imprimées. Ces premiers constats nous permettront d'établir les conditions d'expérimentation optimales, qui primeront pour la suite de ce travail. Enfin, nous conclurons ce chapitre par la définition des possibilités à ce stade, c'est-à-dire des problèmes technologiques à résoudre pour optimiser les performances du système – et en particulier pour créer du mat.

# 1. Généralités

Nous avons vu dans la première partie de ce manuscrit qu'arriver à « faire du mat » était une problématique sérieuse pour les industriels, tant du point de vue réel (les vrais matériaux sont souvent mats) que du point de vue esthétique (les aspects de surface mats sont appréciés). Pour faire du mat de manière traditionnelle, différents moyens existent : nous les avons considérés en Partie 1. Mais qu'en est-il en impression 3D ? Ces technologies, relativement nouvelles encore, se positionnent maintenant comme un acteur incontournable de l'industrie du XX<sup>ème</sup> siècle. Si le mode de création du relief est maintenant bien maîtrisé, la gestion de l'apparence des surfaces produites reste un défi.

## 1.1 L'impression 3D

On désigne par « impression 3D » les procédés technologiques qui permettent la création d'une forme par injection ou fusion d'une matière donnée, au cours d'un processus entièrement numérique (Figure B.1 1). L'impression 3D est une technologie dite *additive* : la matière est ajoutée, couche après couche, pour former le relief souhaité. Les technologies 3D font donc opposition aux traditionnels procédés par soustraction : le fraisage ou la découpe, où l'on enlève de la matière pour créer un objet. Des dizaines de procédés différents existent, et chacun donne un objet final au rendu différent, soit parce que la matière utilisée n'est pas la même, soit parce que l'ajout de la couleur est possible. L'intérêt majeur de l'impression 3D est la possibilité de créer des formes nouvelles, impossibles à fabriquer autrement : le dépôt successif de matière ouvre le champ des possibles.



Figure B.1 1 – Etapes de l'impression 3D. Le fichier 3D peut être issu d'un scan, ou créé numériquement sur un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO).

Le procédé d'impression 3D va différer selon le matériau employé pour créer le relief. On trouve des procédés qui impriment des plastiques, résines, métaux, sables, céramiques, verres, etc. Notons que la plupart des procédés d'impression 3D nécessitent une étape de finition, pendant laquelle l'objet est peint, vernis ou poncé, afin d'obtenir un rendu visuel satisfaisant. Nous listons ci-dessous quelques procédés 3D [93, 94, 95].

### 1.1.1 Fusion

- Le modelage par dépôt de fil (*Fused Deposition Modeling* – FDM) est la technologie 3D la plus abordable. Un filament de plastique, présenté en bobine, fond en passant dans une buse d'extrusion chauffée et est déposé couche après couche pour former l'objet. Plus la couche imprimée est fine, et plus l'objet résultant a une rugosité satisfaisante. En ajoutant une ou plusieurs têtes d'impression, on peut imprimer en plusieurs couleurs.

- Le frittage sélectif par laser (*Selective Laser Sintering* – SLS) crée un objet par addition de couches de poudre fondue. Il convient à différents matériaux : plastique, céramique, verre ou métal (alors appelé *Direct Metal Laser Sintering* – DMLS). La poudre est contenue dans un bac ; un rouleau en dépose une fine couche que le laser va venir solidifier en certains endroits, et ainsi de suite pour toutes les couches.
- La Fusion par Faisceau d'Electrons (*Electron Beam Melting* – EBM) fait fondre une poudre métallique sous un faisceau d'électrons et non sous un laser. L'objet est toujours créé couche par couche.

### 1.1.2 Polymérisation

- En stéréo-lithographie (*Stereolithography Apparatus* – SLA), une résine liquide en photopolymère est exposée peu à peu à la lumière d'un laser UV jusqu'à former un objet complet. Sous l'effet des UV, la résine se solidifie ; le plateau descend et le laser peut alors imprimer la seconde couche. L'objet est ensuite rincé et cuit au four, où il durcit. La SLA est le premier procédé 3D apparu sur le marché, en 1986.
- Deux variantes de ce procédé sont le Traitement Numérique de la Lumière (*Digital Light Processing* – DLP), dans lequel un projecteur inactinique (rouge) est utilisé à la place d'un laser UV, et le *Continuous Liquid Interface Production* (CLIP) où un projecteur envoie une séquence continue d'images UV sur un bain de résine.
- Les imprimantes MultiJet, toujours très proches de la stéréo-lithographie, projettent des gouttes d'encre polymérisable avec une tête d'impression puis les figent avec une lampe UV, fixée à la tête d'impression [96].

### 1.1.3 Autres procédés

D'autres procédés existent, comme la Projection de liant (*Binder Jetting*), où de la poudre est étalée couche après couche, et liée avec des encres de couleur, ou le Laminage par Dépôt Sélectif (*Selective Deposition Lamination* – SDL), proche de la Fabrication d'Objet par Laminage (*Laminated Object Manufacturing* – LOM), qui colle et découpe au laser des couches de papier plastique selon la forme désirée.

### 1.1.4 Comparaison des technologies

La Table B.1 1 récapitule les différents procédés d'impression 3D, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Notons que la plupart des procédés actuels ont un rendu rugueux, sur lequel les lignes d'impression restent souvent visibles ; la couleur doit être ajoutée après l'impression, en phase de finitions.

Technologie	Procédé	Avantages	Inconvénients	Rendu	Matériau
Dépôt de fil – FDM	Fusion	Facile et solide.	Structure en escalier.	Couleurs possibles. Aspect granuleux mat.	Plastique
Frittage sélectif par laser – SLS	Poudre Fusion	Rapide. Peu de déchets.	Réglage fin du laser. Grains homogènes	Rugueux.	Plastique Métal
Fusion par faisceau d'électrons – EBM	Poudre Fusion	Rapide et solide.	Peu précis. Impossible de faire de gros objets.	Nécessite finitions.	Métal
Stéréolithographie – SLA	Photo polymérisation	Surface lisse. Précis.	Fragile.	Nécessite finitions.	Résine
Traitement par lumière numérique – DLP	Photo polymérisation	Surface lisse. Précis.	Fragile.	Nécessite finitions.	Résine
Continuous Liquid Interface Production – CLIP	Photo polymérisation	Extrêmement rapide. Objets lisses.	Fragile.	Couleurs possibles.	Résine
MultiJet	Projection de matériau	Précis.	Lent.	Couleurs possibles.	Résine
Projection de liant	Projection de poudre	Rapide.	Fragile.	Couleurs possibles.	Résine
Laminage par dépôt sélectif – SDL	Laminage	Rapide.	Peu précis, non homogène.	Couleurs possibles.	Papier, plastique ou métal

Table B.1 1 – Tableau comparatif des différents procédés 3D.

Le marché de l'impression 3D est en réelle expansion, et les procédés se multiplient. Pour chaque application, il convient de choisir le procédé le plus adapté. On voit que les fabricants mettent pour l'instant l'accent sur le relief, et la vitesse à laquelle il est obtenu, plus que sur le rendu visuel final de l'objet.



Figure B.1 2 – Exemples d’imprimés 3D. Objets imprimés par (a) le procédé CLIP et (b) le procédé FDM. Images : 3dnatives.com. (c) Personnages colorés imprimés par Binder Jetting. Image : sculpteo.com.

La couleur est le paramètre qui a attiré l’attention des chercheurs en premier. On a vu que maintenant, plusieurs catégories de procédés permettaient l’obtention d’un objet final coloré. Mais la surface finale, qui est soit très rugueuse et mate, soit lisse et brillante, reste très éloignée de l’aspect d’un matériau réel, comme on le voit Figure B.1 2.

## 1.2 L’impression 2.5D : un procédé hybride

La technologie d’impression dite « 2.5D », ou impression en relief, se distingue des précédentes par son procédé et par les qualités visuelles de l’imprimé résultant. Elle est hybride car elle combine les avantages de différents procédés technologiques pour un résultat qui ne peut pour le moment pas être obtenu avec une imprimante 3D classique.

### 1.2.1 Echelles du relief

L’impression numérique 2D est bien connue, et permet la reproduction de documents sur un support plat, sans autre relief que celui créé par le dépôt simple d’une couche d’encre. L’impression 3D, nous l’avons dit, crée un objet en relief totalement indépendant d’un support, formé d’un matériau rigide et parfois coloré. L’impression 4D, dont les créations évoluent avec le temps, et l’impression 5D, qui crée avec 5 axes des objets inédits, se développent à présent. A mi-chemin entre 2D et 3D, il existe aussi l’impression « 2.5D », dite impression en relief. L’entreprise Océ PLT™ a développé ce procédé dès 2010, suivie sur le marché par des entreprises comme Casio™ ou SwissQPrint™ (Figure B.1 3).

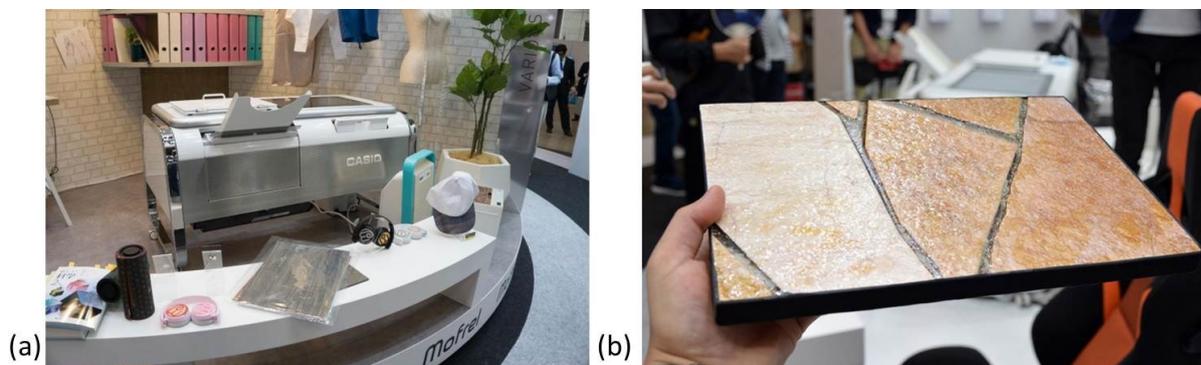


Figure B.1 3 – L’imprimante 2.5D « Mofrel » développée par Casio™, présentée à l’automne 2017. On voit en (b) que les surfaces brillent. Le matériau n’est pas vraiment réaliste... Images : 3dnatives.com

L'impression 2.5D donne du relief aux imprimés 2D classiques, tout en conservant une large gamme de couleurs [97, 98].

### 1.2.2 Création du relief

Le relief 2.5D est créé par la superposition de couches d'encre, qui se polymérisent très rapidement sous un rayonnement UV et permettent la création d'une forme sur une certaine épaisseur (Figure B.1 4). Les couches sont créées par jet d'encre : les têtes d'impression éjectent une encre polymérisable, qui sèche sous UV. Les têtes d'impression *CMJN* – cyan, magenta, jaune et noir, comme sur une imprimante jet d'encre normale – rendent possible la couleur [99].

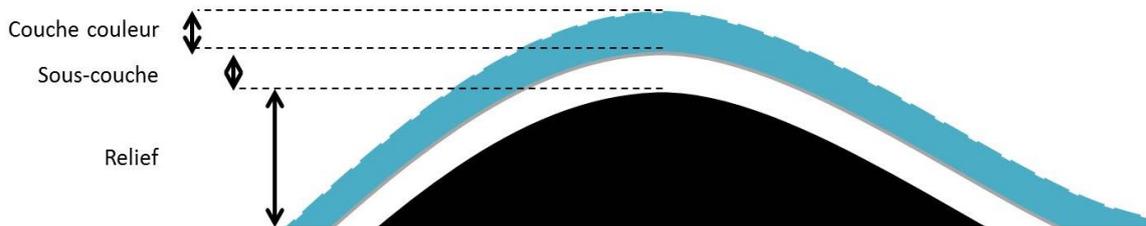


Figure B.1 4 – Relief créé par le procédé 2.5D. Sur la couche qui forme le « relief », elle-même formée de plusieurs couches d'encre, peuvent être superposées d'autres couches, colorées par exemple.

La technologie additive rapproche l'impression 2.5D d'une impression 3D, et le procédé jet d'encre est le même qu'en impression 2D couleurs. La technologie est assez proche de l'impression 3D MultiJet, car toutes deux utilisent des têtes d'impression et projettent de l'encre qui se polymérise sous UV. Pourtant, mécaniquement, les deux procédés sont différents, le MultiJet permettant la création d'objets 3D complets (pour soutenir les contre-dépouilles, une couche support en cire est imprimée en même temps que l'objet, puis ôtée manuellement), et l'impression 2.5D celle de surfaces seulement. De plus, d'après les exemples en ligne, le procédé MultiJet ne permet pas l'impression d'une large gamme de couleurs. L'impression 2.5D est donc bien à mi-chemin entre impression couleur et impression 3D.

Néanmoins, puisque la technique est additive, les motifs en contre-dépouille ne peuvent être créés : il faut de la matière pour soutenir chaque nouvelle couche d'encre (voir Annexe A.1.2 pour la définition des termes liés à la sculpture). C'est la première limite : tous les reliefs ne peuvent être créés, à la différence d'autres procédés 3D. Mais la technologie 2.5D compense cette contrainte par ses qualités visuelles.

### 1.2.3 Qualités visuelles

Par son procédé même, l'impression 2.5D permet la création de surfaces d'une très grande qualité visuelle. La gamme de couleurs reproductibles est étendue (impression couleur de grande qualité) ; un canal de vernis permet de gérer le brillant et rend les effets de

transparence envisageables. La résolution de la machine, annoncée à 450 pixels / pouce<sup>6</sup>, est suffisamment élevée pour donner une certaine finesse de détails. La Table B.1 2 donne les performances comparées des impressions 2D, 2.5D et 3D. Des exemples de textures sont présentés Figure B.1 5.

Impression 2D couleurs			
Couleur	Texture	Brillant	Transparence
● ● ●	✘	●	✘

Impression 3D			
Couleur	Texture	Brillant	Transparence
●	● ● ●	✘	✘

Impression 2.5D			
Couleur	Texture	Brillant	Transparence
● ● ●	● ● ●	● ●	● ●

Table B.1 2 – Performances à ce stade des différents procédés d'impression.



Figure B.1 5 – Exemples de textures réalistes réalisées par Océ PLT™ : brique, paille et cuir. On distingue quelques effets de brillants, surtout sur la paille et le cuir. Image : [www.imaging-resource.com](http://www.imaging-resource.com).

#### 1.2.4 Applications

Le procédé d'impression 2.5D trouve de nombreuses applications, tant en design que dans les domaines de la mode ou du luxe. Les possibilités en reproduction de matériaux permettent d'envisager la recreation ou la création de tableaux et fac-similés, à destination d'un public malvoyant par exemple. Ainsi ces dernières années, plusieurs expositions ont inclus des fac-similés d'œuvres en 2.5D dans leur parcours muséographique.

<sup>6</sup> 1 inch = 1 pouce = 2.54 cm.



Figure B.1 6 – Exemple d’application en muséographie : (a) ronde-bosse 3D portée en (b) imprimé 2.5D. (a) Tête royale d’Oba, collections du musée Picasso, exposition « Picasso et les Arts Premiers », musée du Quai Branly, 2017. (b) Imprimé en relief réalisé grâce au mécénat de la fondation Mikli. Image : M. Page, C2RMF, 2017.

La technologie 2.5D se prête ainsi à la fois à la mise en relief d’objets ou de sculptures, pour leur compréhension par un public malvoyant (Figure B.1 6), et à la recreation de tableaux aux coups de pinceaux en relief.

#### 1.2.5 Rapprochement avec d’autres techniques de mise en relief

L’impression 2.5D peut être rapprochée d’autres procédés de mise en relief – comme l’embossage ou le thermoformage – qui ne sont pas des technologies additives, pour la qualité visuelle du produit fini (Figure B.1 7).

- Lors de l’embossage ou du gaufrage, des pressions sont appliquées à un matériau plat et déformable, comme le papier, pour créer des formes en relief (l’emboutissage est la même technique, appliquée à de la tôle métallique). Ce procédé est très utilisé pour la conception de papiers peints en relief. On parle de gaufrage pour les mises en relief et d’embossage pour les creux.
- Le thermoformage est la mise en forme d’un matériau ductile (plastique, verre) avec un moule. L’ajout d’une feuille colorée en plastique permet une variété de couleurs sur un relief 2.5D. Les cartes géographiques en relief sont produites ainsi.
- Un thermo-relief peut également être obtenu en faisant gonfler au four des poudres en résine. Certains imprimeurs utilisent ce procédé pour produire le Braille.

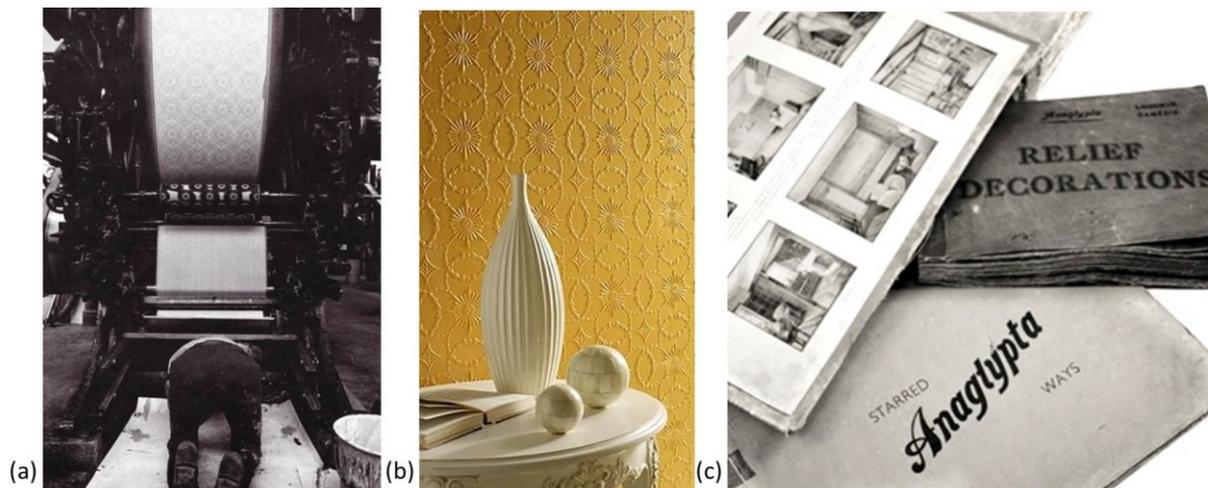


Figure B.1 7 – Le papier peint embossé existe depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle. (a) et (c) La presse à embosser et le catalogue de l'entreprise britannique Anaglypta™. Images : anaglypta.co.uk  
 (b) Un papier peint moderne de la firme britannique Lincrusta™. Image : lincrusta.com. Le lincrusta™ est inventé en 1877 par le fils de l'inventeur du linoléum ! Il s'agit d'un revêtement mural très en relief, lavable, à l'aspect plastique, composé de pulpe de bois et d'huile de lin.

Les procédés industriels pour créer du relief sont nombreux et assez anciens. Mais l'impression 2.5D ouvre des perspectives encore inexplorées.

### 1.3 Paramètres

L'impression 2.5D est régie par différents paramètres, physiques et numériques. Jouer sur ces paramètres peut permettre de changer l'apparence des imprimés, aussi leur compréhension est-elle primordiale. Dans cette section, nous présentons simplement les différents paramètres qui entrent en jeu.

#### 1.3.1 Commande

Le fichier à imprimer doit être décomposé en deux cartographies : l'élévation et la couleur, qui vont être pris en compte par le pilote de l'imprimante (Figure B.1 8). La carte d'élévation est un fichier en niveaux de gris [0 – 255] encodé pour que les niveaux de gris correspondent aux hauteurs désirées. Le noir figure les zones les plus élevées.

Le fichier couleur est au choix :

- un fichier .tif, RGB ou L\*a\*b\*, qui sera converti en *CMJN*.
- Un fichier .tif encodé directement en *CMJN*. C'est cette méthode que nous avons systématiquement utilisée au cours de nos tests.

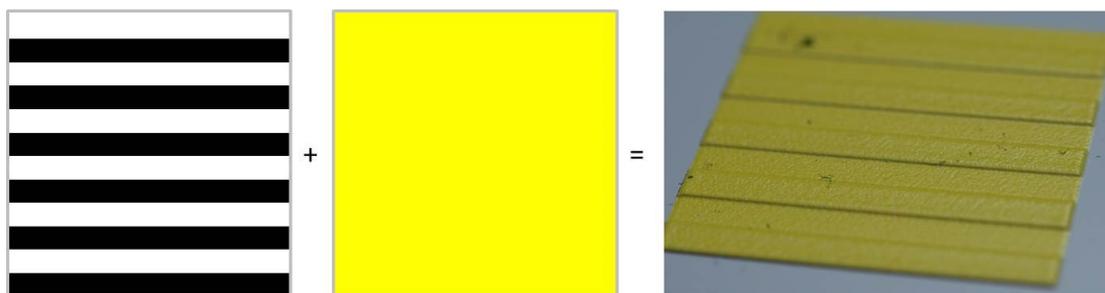


Figure B.1 8 – Création d'un relief. Carte d'élévation et fichier couleur exemples, donnent un patch à bandes jaunes.

### 1.3.2 Paramètres physiques

#### 1.3.2.1 Couleur de l'encre

L'imprimante possède 6 canaux : cyan, magenta, jaune, noir, blanc auxquels s'ajoute un canal de vernis (Table B.1 3). Plusieurs questions sont relatives aux encres :

- Leur structure est-elle la même ? Si leur viscosité est différente, malgré un séchage identique, la rugosité sera impactée.
- Leur brillant est-il similaire ou diffère-t-il fortement selon la composition et la viscosité des encres ?
- Une couleur serait-elle préférable pour effectuer les mesures de rugosité ? La mesure de topographie peut être facilitée par l'emploi d'une encre particulière.

Couleur de l'encre					
Cyan	Magenta	Jaune	Noir	Blanc	Vernis

Table B.1 3 – Canaux couleurs de l'imprimante.

#### 1.3.2.2 Temps d'exposition aux UV

La puissance des lampes UV est invariable mais le temps d'exposition auquel les encres sont soumises peut être réglé par l'utilisateur. Le chariot d'impression possède deux lampes masquées par des panneaux qui peuvent s'ouvrir plus ou moins longtemps, selon le choix de l'utilisateur : minimal, intermédiaire ou maximal (Table B.1 4). L'utilisateur peut fixer des valeurs différentes pour chacune des deux lampes, mais nous nous contenterons ici d'étudier les cas où les valeurs sont les mêmes.

Temps d'exposition aux UV		
Minimal (5)	Intermédiaire (7)	Maximal (9)

Table B.1 4 – Temps d'exposition aux UV.

#### 1.3.2.3 Direction d'impression

L'expérience montre que les performances d'une imprimante diffèrent selon la direction d'impression des objets. Le chariot de l'imprimante ne peut être déplacé, mais on peut orienter l'imprimé de façon à ce que son motif principal soit dans la direction d'impression

privilégiée (Table B.1 5). Les deux directions sont illustrées Figure B.1 9. La direction 1 correspond au sens de déplacement du chariot de l'imprimante. La direction 2 correspond au sens opposé au déplacement du chariot.

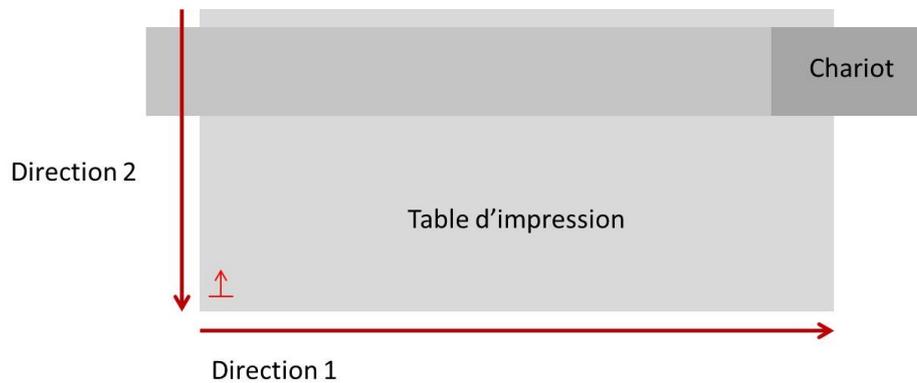


Figure B.1 9 – Table d'impression et directions.

Directions d'impression	
1 – sens du chariot	2 – sens contraire

Table B.1 5 – Directions d'impression.

#### 1.3.2.4 Taille des gouttes

Les gouttes d'encre sont éjectées par des têtes (impression jet d'encre) dont la taille est réglable. En pratique, on peut donc choisir une hauteur de goutte pour chacune des encres employées (Table B.1 6).

Hauteurs des gouttes	
Taille 1	1.76 $\mu\text{m}$
Taille 2	3.52 $\mu\text{m}$
Taille 3	5.28 $\mu\text{m}$
Taille 4	7.04 $\mu\text{m}$
Taille 5	8.80 $\mu\text{m}$
Taille 6	10.56 $\mu\text{m}$

Table B.1 6 – Hauteurs des gouttes.

Nous considérerons les tailles de goutte 1, 3 et 5 comme variables de l'étude, soit des hauteurs à respectivement 1.76  $\mu\text{m}$ , 5.28  $\mu\text{m}$  et 8.80  $\mu\text{m}$ .

**Remarque :** Nous nous basons sur les procédés d'impression récents mis en place par l'entreprise. Nous ne toucherons donc pas au « slicer », qui découpe le relief en ses différentes couches ni au procédé de halftone qui gère la répartition des gouttes d'encre sur la surface pour créer la couche couleur.

### 1.3.3 Transition

Nous pouvons déjà sélectionner certains paramètres d'intérêt : ils sont donnés Table B.1 7. Nous allons tester ces paramètres sur différents échantillons, afin de déterminer les conditions optimales d'expérimentation. L'étude est présentée dans le paragraphe suivant.

Encres	Temps d'exposition aux UV	Direction d'impression	Taille des gouttes
cyan	5 – minimal	1 – sens du chariot	1
magenta	7 – intermédiaire	2 – sens contraire	3
jaune	9 – maximal		5
noir			
blanc			
vernis			

Table B.1 7 – Paramètres d'intérêt.

## 2. Premiers constats en rugosité et en brillant

Nous avons listé les paramètres qui nous intéressaient. Si l'influence de la direction d'impression sur la qualité des imprimés paraît assez évidente, celle du temps de séchage ou de la taille de goutte l'est moins. Nous devons dans un premier temps répondre à quelques questions :

- Quel est le brillant des encres pures, sans sous-couche ?
- Quelle est la rugosité des encres pures, sans sous-couche ?

Ces deux premiers points nous donneront la base avec laquelle nous pourrons comparer nos résultats futurs. Ajoutons :

- Quelle est l'influence de la couleur de l'encre sur ces résultats (rugosité, brillant) ?
- Quelle est la couleur qui paraît avoir les meilleures qualités (tenue, faible viscosité, et surtout, possibilités de mesure) ?
- Quel est l'influence du temps d'exposition aux UV sur la rugosité et le brillant ?
- Quelle est l'impact de la taille de goutte sur la rugosité et le brillant ?

### 2.1 Protocole

Différents patches ont été imprimés, en faisant varier le nombre de couches déposées, c'est-à-dire la hauteur d'encre imprimée. Lors d'un premier test, que nous appellerons *Protocole A*, 45 patches ont été imprimés à 8.8 µm de haut (soit 1 couche d'encre), 17.6 µm de haut (soit 2 couches) et 44 µm de haut (soit 5 couches), à la taille de goutte fixe 5. Les temps d'exposition aux UV varient (minimal, intermédiaire et maximal), ainsi que les couleurs d'encre (voir Figure B.1 10).

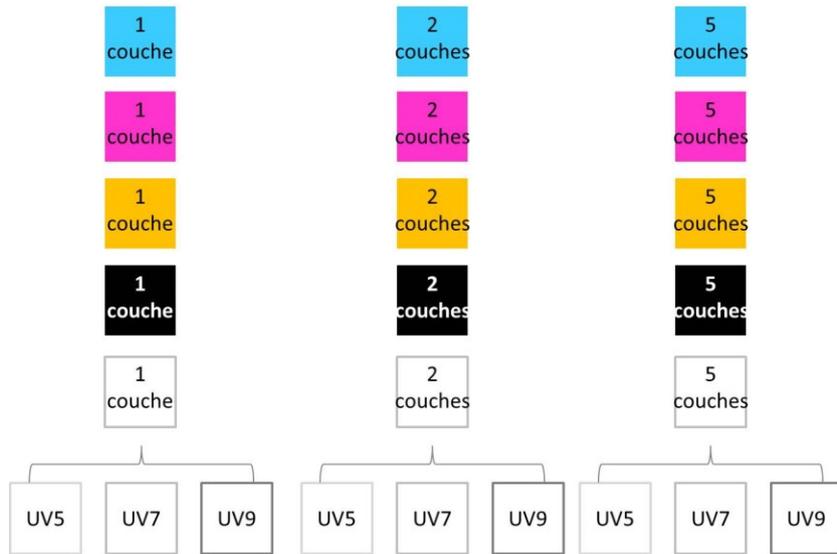


Figure B.1 10 – Protocole A. L’encre C, M, Y, K ou W est apposée en 1, 2 ou 5 couches, et séchée sous les trois temps d’exposition aux UV. Le niveau de goutte est fixé à 5.

Lors du deuxième test, appelé *Protocole B*, l’encre cyan a été sélectionnée, et l’on fait varier les temps d’exposition aux UV et la taille des gouttes, pour deux hauteurs de couches différentes (voir Figure B.1 11). La sous-couche est dans tous les cas constituée d’une unique couche d’encre blanche, à la taille de goutte 5, d’une hauteur de 8.8  $\mu\text{m}$ , supposée homogène. Pour chacun de ces patches, le niveau de brillant à 60° a été mesuré à l’aide d’un brillance-mètre et des vues sous microscope numérique Hirox™ ont été réalisées. De plus, pour certains patches bien choisis, la rugosité a été mesurée avec la station de microtopographie du C2RMF.

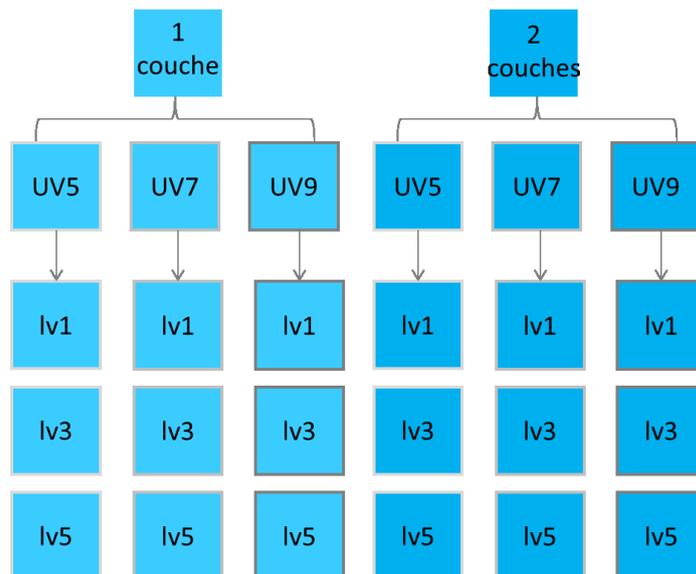


Figure B.1 11 – Protocole B. L’encre C est sélectionnée, et les patches sont imprimés en faisant varier le temps d’exposition aux UV, et le niveau de goutte, pour trois hauteurs de couche différentes.

Enfin le troisième test, appelé *Protocole C*, porte sur le relief des patches. La hauteur adressée est toujours 50  $\mu\text{m}$ . Trois fréquences sont considérées : 2.5 cycles / pouce, 5 cycles / pouce et 25 cycles / pouce. Un cycle correspond à une alternance « bande haute / bande basse ». Aucun offset n'est appliqué : la bande basse est donc toujours à 0  $\mu\text{m}$ . Les encres cyan, magenta, jaune et noire sont considérées à temps d'exposition et taille de goutte fixes. L'encre cyan est de plus considérée à temps d'exposition variable, puis à niveau de goutte variable, et enfin selon deux directions d'impression. La Figure B.1 12 résume le Protocole C.

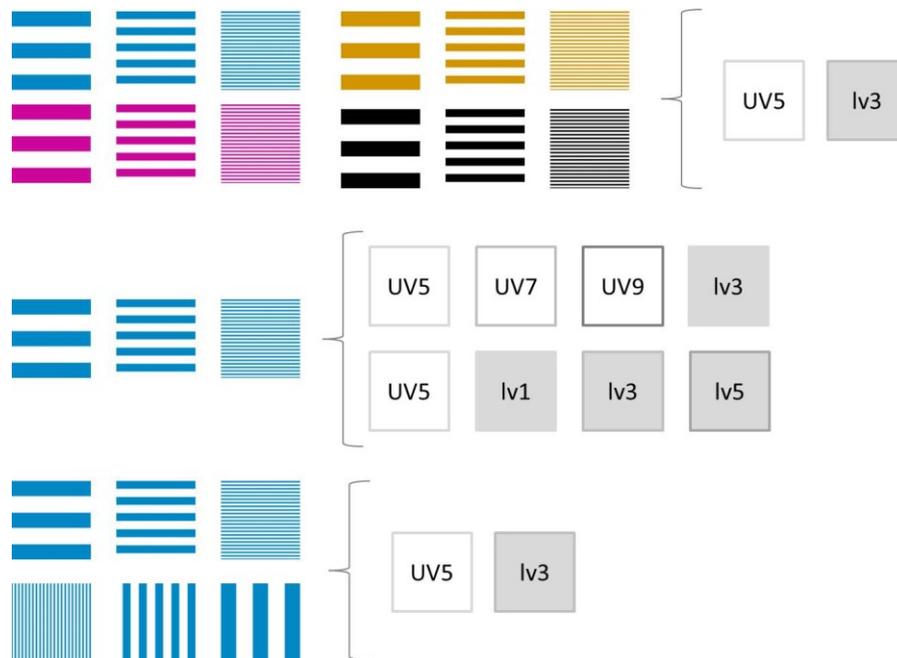


Figure B.1 12 – Protocole C. Les fréquences choisies sont 2.5 cycles / pouce, 5 cycles / pouce et 25 cycles / pouce. Toutes les encres sont testées. Pour les patches cyan, la taille de goutte, le temps d'exposition aux UV et la direction d'impression sont également considérés.

Le relief de ces patches est mesuré avec la station de microtopographie du C2RMF : des profils de 20 mm de long sont tirés et analysés en hauteur. Les données sont moyennées sur trois profils par patches. Notons que le support utilisé pour l'ensemble des tests consiste en une plaque d'aluminium composite rigide et lisse, le Dibond™, de rugosité quadratique  $S_q = 0.65 \mu\text{m}$ . Ce matériau, d'usage fréquent en impression de jet d'encre, est commode de par sa rigidité qui supporte un grand nombre d'impressions successives et sa surface plane sur laquelle l'encre se dépose en couches régulières. Pour s'affranchir de ce support, nous avons dans tous les cas imprimé une première sous-couche d'encre blanche, au niveau de goutte 5, sur laquelle sont ensuite imprimées les couches colorées. On considèrera donc que le support est constitué par l'encre elle-même.

## 2.2 Influence des paramètres d'impression sur la rugosité et le brillant

### 2.2.1 Influence du temps d'exposition aux UV

Lorsqu'une seule couche d'encre est déposée à la taille de goutte 5, sur une sous-couche blanche homogène, on constate Figure B.1 13 que le niveau de brillant augmente lorsque le

temps d'exposition aux UV augmente. Pour l'encre noire en particulier, la différence est nettement visible : sous le temps d'exposition minimal, la couche présente un aspect plus mat qu'avec les temps d'exposition intermédiaire et maximal. La tendance est la même pour toutes les couleurs d'encres.

En revanche, lorsque deux couches ou plus sont imprimées, la tendance semble s'inverser ; pour l'encre cyan à deux couches, on voit par exemple que le niveau le plus mat est obtenu sous le temps d'exposition maximal. La tendance est la même pour les autres encres, quoique moins marquée pour le magenta, le jaune et le blanc que pour le cyan et le noir. Néanmoins, les différences observées sont de l'ordre de 1 ou 2 GU au maximum, ce qui pour ces niveaux de brillant ne forme pas une différence visuelle perceptible : nous nous trouvons dans la gamme des brillants intermédiaires, où l'œil humain fait mal la différence entre deux brillants proches [44]. Par conséquent, on peut considérer que le temps d'exposition minimal aux UV est un choix d'expérience pertinent : il donne les résultats les plus mats, lors d'une impression rapide.

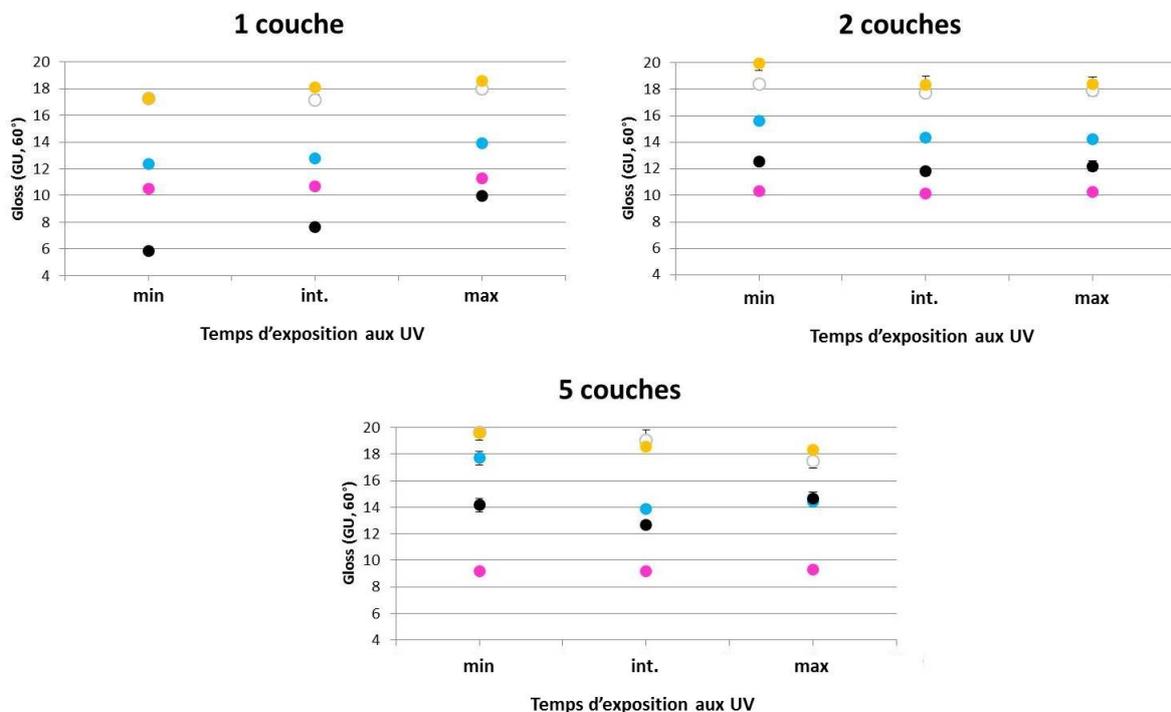


Figure B.13 – Résultats du Protocole A. Pour les cinq encres, le brillant a été mesuré à 60°. Il est tracé ici en fonction du temps d'exposition aux UV, pour 1, 2 et 5 couches d'encre déposées. La répétabilité est inférieure à 2 GU.

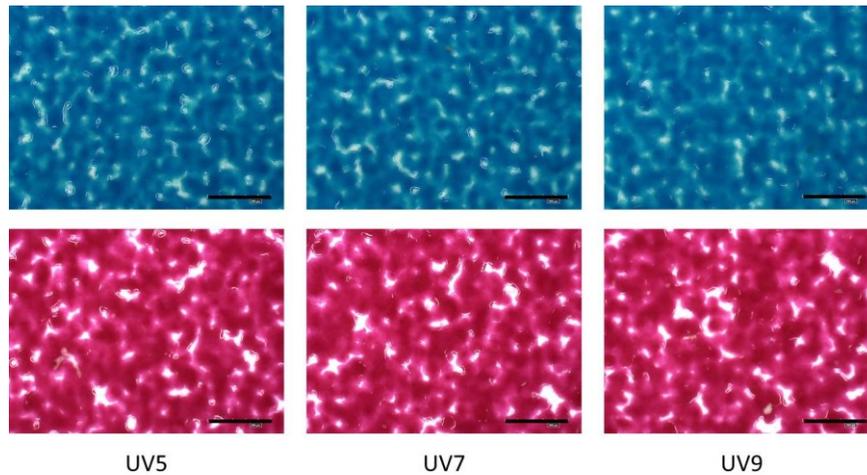


Figure B.1 14 – Prises de vue au microscope numérique. Cas à 1 couche, encres cyan et magenta, niveau de goutte 5. Les UV varient. La barre d'échelle figurée en noir équivaut à 500  $\mu\text{m}$ .

Sur les vues Hirox™ présentées Figure B.1 14, aucune différence n'apparait entre les surfaces selon les temps d'exposition. La mesure de rugosité sous microtopographie (Figure B.1 15) confirme les résultats obtenus au brillance-mètre : la rugosité des encres cyan, noire, jaune et blanche décroît avec le temps d'exposition aux UV, ce qui implique une légère augmentation du brillant. Celle du magenta reste quasiment identique.

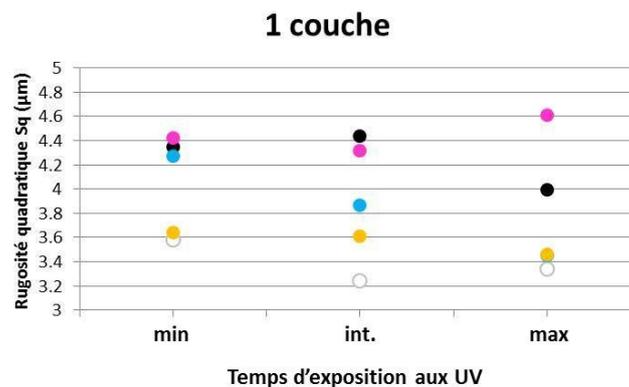


Figure B.1 15 – Rugosité quadratique moyenne en fonction du temps d'exposition aux UV, pour 1 couche d'encre cyan, magenta, jaune, noire et blanche, au niveau de goutte 5.

### 2.2.2 Variations selon les encres

La Figure B.1 16 montre que les cinq encres ont des rugosités différentes, ce qui implique bien des niveaux de brillant différents. Pour une couche, on peut faire deux groupes : les encres cyan, magenta et noire d'un côté ( $S_q = 4.3 \mu\text{m}$  au temps d'exposition minimal), et les encres jaune et blanche de l'autre, dont la rugosité est un peu plus faible ( $S_q = 3.6 \mu\text{m}$ ). Le brillant des encres jaune et blanche est donc logiquement un peu plus élevé que celui des encres cyan, magenta et noire. On voit tout de suite que l'égalisation des niveaux de brillant en fonction des couleurs d'encre posera problème. Ces différences en rugosité sont probablement dues aux propriétés de viscosité de chacune des encres.

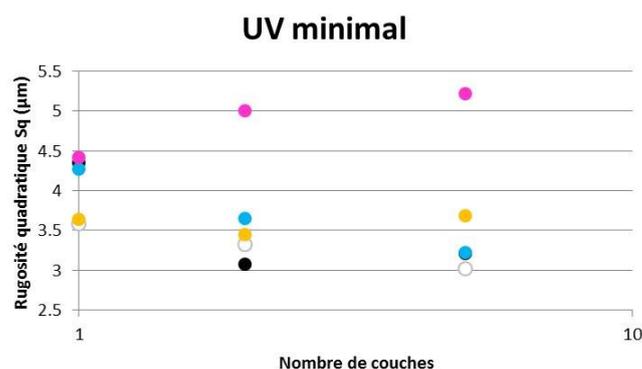


Figure B.1 16 – Rugosité quadratique moyenne en fonction du nombre de couches imprimées, pour les encres cyan, magenta, jaune, noire et blanche, au niveau de goutte 5 et au temps d'exposition aux UV minimal.

Lorsque le nombre de couches déposées augmente, à temps d'exposition minimal fixe, deux tendances s'observent : la rugosité des encres cyan, jaune, noire et blanche baisse, ce qui signifie que l'encre s'étale et que le brillant baisse également. A contrario, la rugosité de l'encre magenta augmente légèrement.

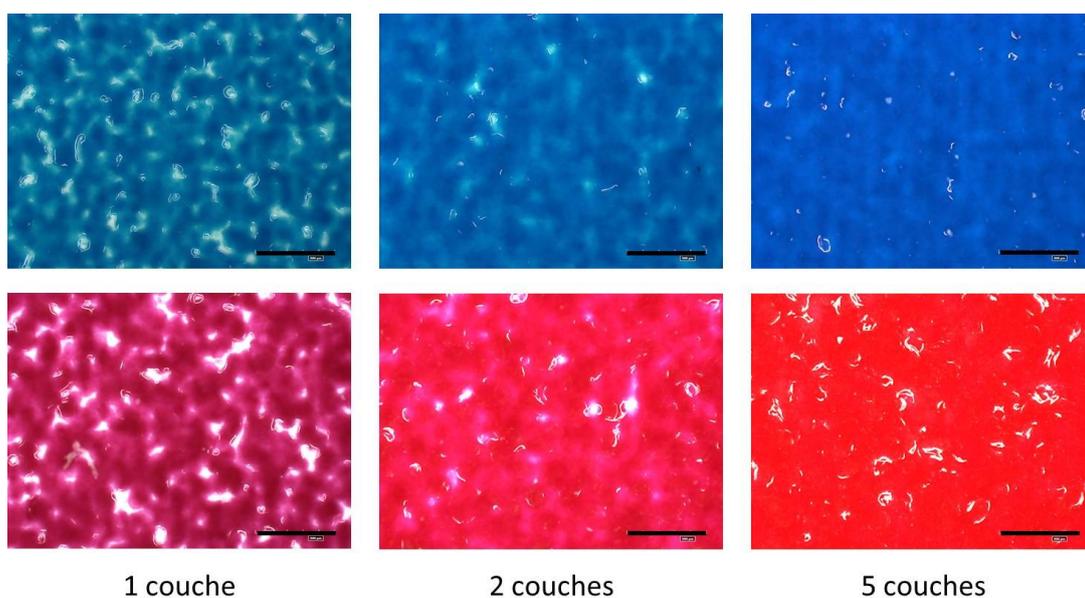


Figure B.1 17 – Prises de vue au microscope numérique. Encres cyan et magenta, niveau de goutte 5, temps d'exposition minimal. Le nombre de couches varie. La barre d'échelle figurée en noir équivaut à 500  $\mu\text{m}$ .

Notons au passage que la couverture d'encre n'est pas totale au niveau de goutte 5 : on voit Figure B.1 17 que même sous deux couches, le support blanc reste visible. Pour obtenir une couverture totale, il faut augmenter encore la taille des gouttes ou superposer au moins 3 couches d'encre.

On lit sur la Figure B.1 18 que pour le cyan et le noir, le brillant augmente donc avec le nombre de couches : ajouter des couches lisse la surface et augmente le niveau de gloss. A temps d'exposition aux UV élevé (7 ou 9), la différence en brillant n'est pas sensible, mais à

temps d'exposition court (5), le brillant augmente nettement avec le nombre de couches, ce qui suggère que le séchage rapide de l'encre n'empêche pas qu'elle s'étale, et confirme les résultats de Teun Baar [99]. L'encre noire, l'encre jaune et l'encre blanche présentent la même tendance.

Sur une gamme de brillant plus limitée, les niveaux de brillants atteints par l'encre magenta à plusieurs couches sont plus faibles que les niveaux de brillants à une couche. La viscosité de cette encre serait a priori différente de celle des autres encres colorées. Comme elle est nettement différente des quatre autres encres, nous laisserons l'encre magenta de côté.

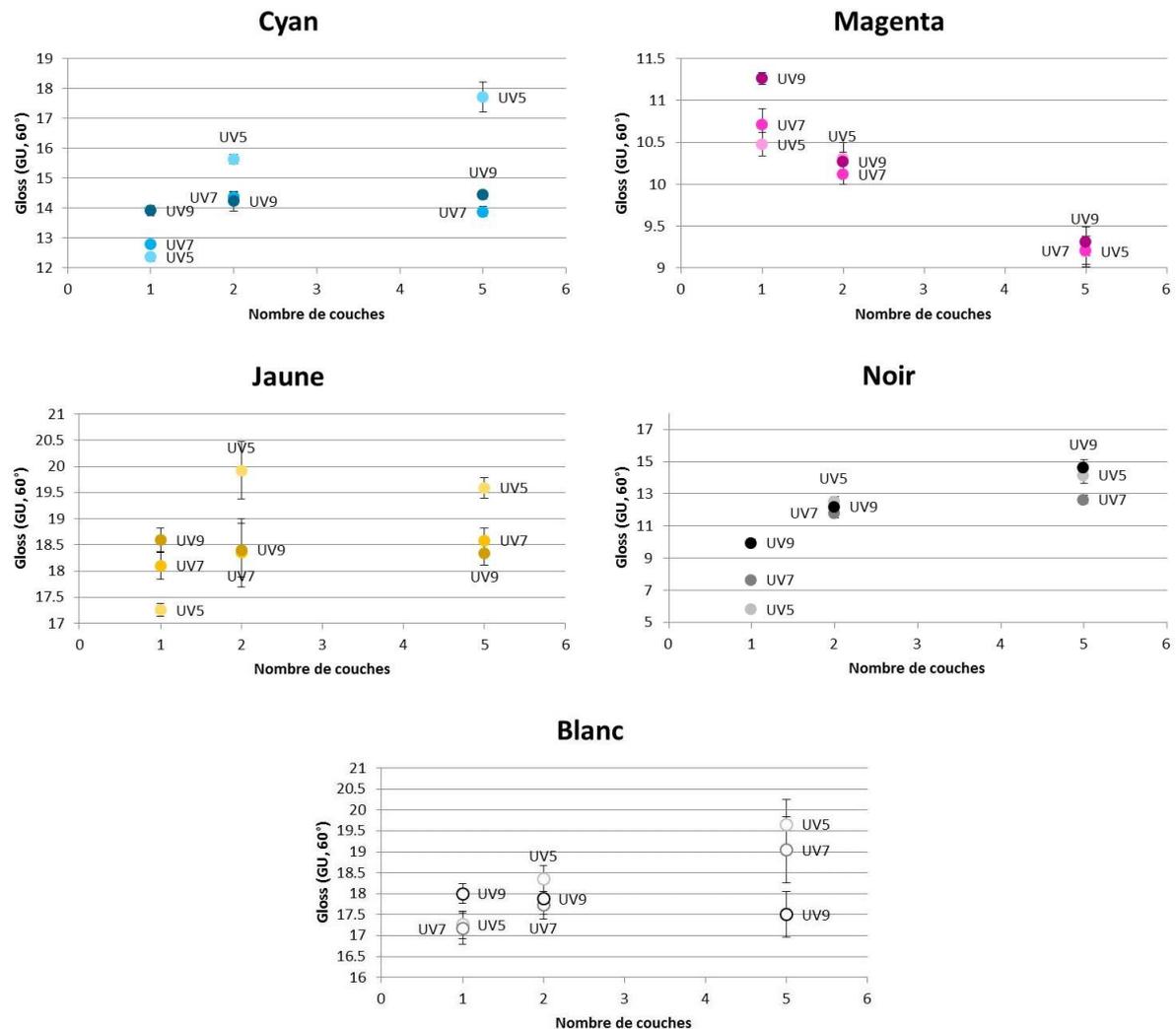


Figure B.1 18 – Niveau de brillant des cinq encres, en fonction du nombre de couches apposées et du temps d'exposition aux UV.

### 2.2.3 Influence du niveau de goutte

Pour l'encre cyan, au temps d'exposition court, on fait varier le niveau de gouttes utilisé de son minimum (1.78  $\mu\text{m}$ ) à 5.28  $\mu\text{m}$  puis 8.8  $\mu\text{m}$ . Ce qui signifie que les hauteurs de gouttes tout comme leur étalement vont varier d'un patch à l'autre.

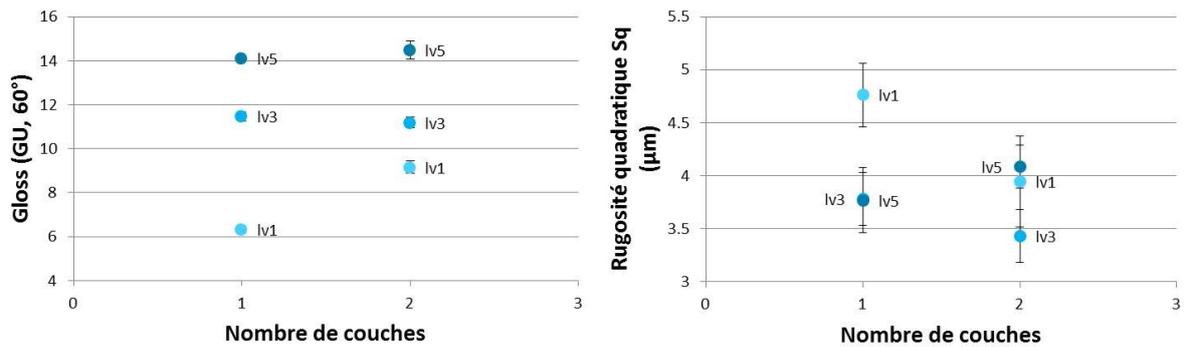


Figure B.1 19 – Gloss et rugosité quadratique moyenne en fonction du nombre de couches imprimées, pour l’encre cyan, au temps d’exposition aux UV minimal. Le nombre de couches et le niveau de goutte varient.

Comme prévu, le gloss augmente nettement avec le niveau de goutte. Ceci est très clair lorsqu’on regarde la Figure B.1 19 : plus la taille de goutte est grande, plus la couche est lisse, et donc plus le brillant est élevé.

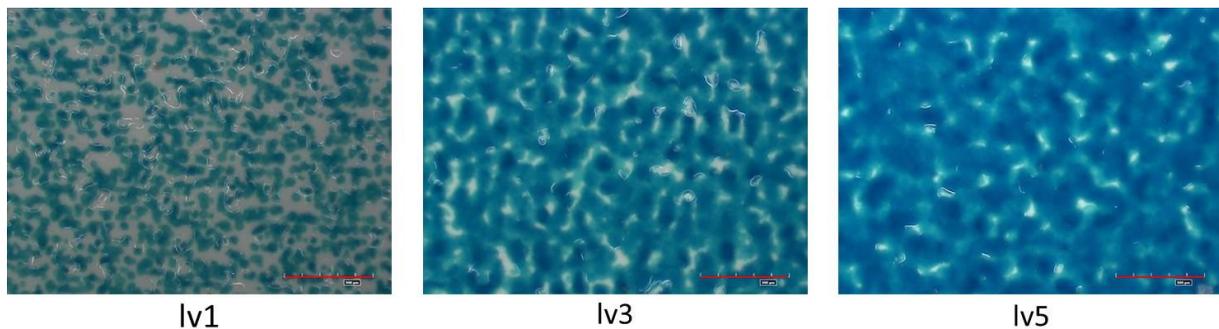


Figure B.1 20 – Prises de vue au microscope numérique. Encre cyan, temps d’exposition minimal, une couche imprimée. Le niveau de goutte varie. La barre d’échelle figurée en rouge équivaut à 500 µm.

**Remarque :** Nous avons conduit une courte expérience supplémentaire, en imprimant une seule goutte, à la taille 1, 3 ou 5, et aux trois temps d’exposition aux UV. L’expérience a été répétée cinq fois. On observe que la largeur des gouttes varie évidemment en fonction de la taille choisie, la goutte de taille 5 étant presque deux fois plus large que la goutte de taille 1. Mais de plus, le nombre de gouttes « satellites » éjectées change avec la taille de goutte : au niveau 1, une ou deux gouttes sont éjectées, de taille presque équivalente. A la taille 3 ou 5, plus de trois gouttes sont éjectées, mais les gouttes satellites sont de taille modeste comparées à la goutte principale. Il n’y a pas de différence entre les temps d’exposition aux UV. Les résultats sont présentés Figure B.1 21 et en Table B.1 8.

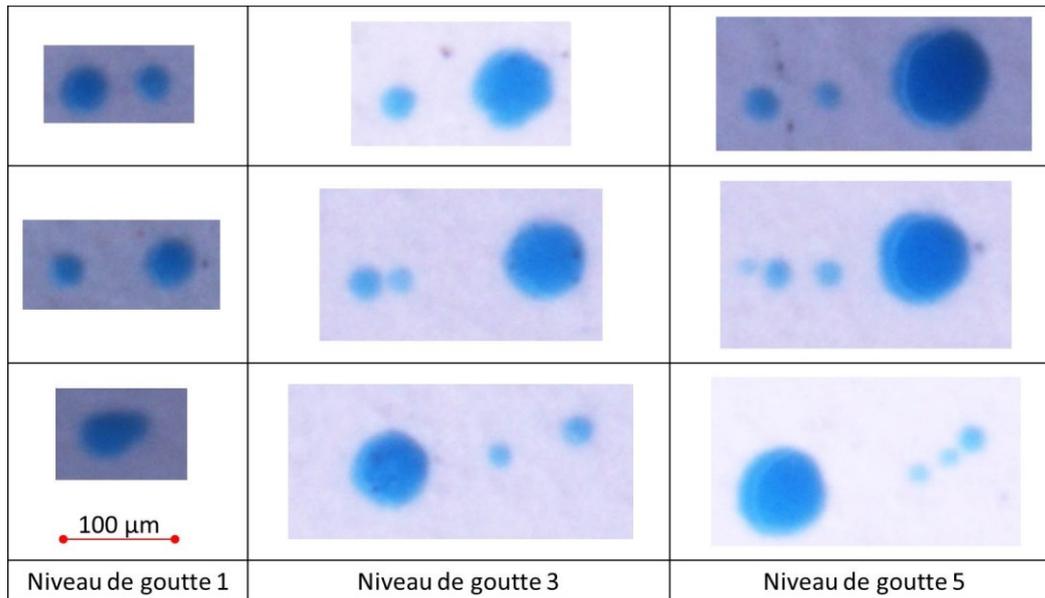


Figure B.1 21 – Taille des gouttes. Images représentatives choisies parmi les  $3 \times 3 \times 5$  prises de vue effectuées sous microscope numérique.

		Nombre de gouttes	Largeur de la goutte principale ( $\mu\text{m}$ )	Largeur des gouttes satellites ( $\mu\text{m}$ )
Lv1	UV5	2	48.8	31.0
	UV7	2.2	45.0	28.7
	UV9	1.8	52.5	30.4
Lv3	UV5	2.8	75.3	27.6
	UV7	3.2	74.0	23.7
	UV9	3.4	74.1	23.6
Lv5	UV5	3.6	89.8	23.4
	UV7	3.2	89.0	25.5
	UV9	3.2	95.0	27.4

Table B.1 8 – Nombre de gouttes, largeur de la goutte principale et largeur moyenne des gouttes satellites, pour trois niveaux de gouttes, chacun aux temps d'exposition aux UV minimal, intermédiaire et maximal. Tous les résultats sont moyennés sur cinq tests.

#### 2.2.4 Conclusion

A ce stade, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- pour augmenter le brillant, sur une couche d'encre, augmenter le temps d'exposition aux UV. Pour diminuer le brillant, sur une couche d'encre, choisir le temps d'exposition aux UV le plus faible.
- Augmenter le nombre de couche lisse la surface et donc augmente le brillant, sauf pour le magenta dont la viscosité est supposée différente de celle des autres encres.
- Augmenter la taille des gouttes contribue à lisser la surface, et donc à augmenter le brillant.
- Les encres ne brillent pas toutes de la même façon ; en particulier, le magenta a un comportement différent des 4 autres encres.

- La meilleure finesse de détail est obtenue pour le niveau de gouttes 1, qui produit les gouttes les plus petites.
- La projection, en fonction de la taille de gouttes choisie, d'un certain nombre de gouttes annexes de taille non négligeable modifie la rugosité des surfaces.

## 2.3 Influence des paramètres d'impression sur le relief

Aux résultats en brillant et en rugosité, ajoutons quelques remarques sur les structures obtenues, en termes de hauteurs. Au cours du test supplémentaire (Protocole C), nous avons comparé les performances en hauteurs de chacune des encres : la hauteur demandée est-elle réellement atteinte ? Cette capacité relative renseigne sur la viscosité des encres et va permettre de sélectionner une couleur plutôt qu'une autre pour le reste de l'étude.

### 2.3.1 Aspect des profils

Il apparaît que les encres ne sont pas toutes aussi « faciles » à mesurer en microtopographie. L'encre cyan comme l'encre jaune ne posent aucun problème ; en adaptant légèrement la fréquence de mesure et l'intensité émise, on obtient un profil complet, avec assez peu de points non mesurés pour que la mesure soit valide. En revanche, l'encre magenta et l'encre noire présentent plus de points non mesurés, comme on le voit Figure B.1 22.

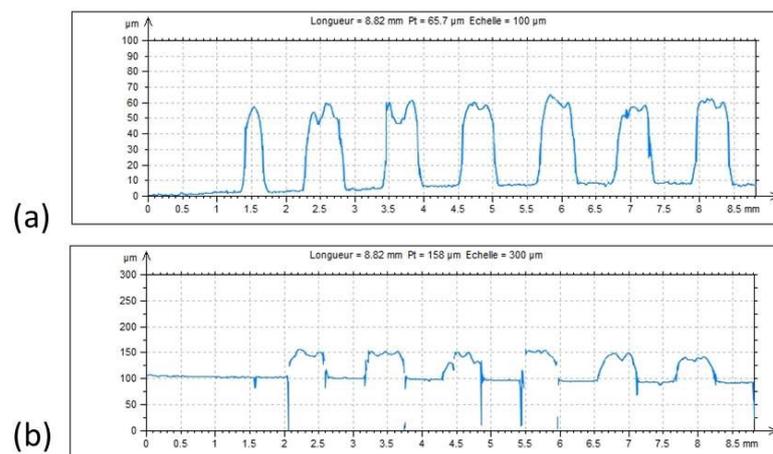


Figure B.1 22 – (a) Profil obtenu sur le patch cyan à la fréquence 5 cycles / pouce, niveau de goutte 3, exposition aux UV minimale. (b) Profil obtenu sur le patch magenta dans les mêmes conditions.

Il est possible que l'encre noire, quoique brillante, absorbe une partie du flux lumineux envoyé par la sonde, ce qui dégraderait le signal reçu. Pour l'encre magenta, le résultat est plus étonnant. Au vu des tests réalisés, qui ont nécessité des réglages plus difficiles que pour les autres encres, nous ne recommandons pas son emploi systématique. Notons au passage que les points non mesurés se situent dans les pentes, ce qui ne fausse pas les résultats de l'expérience sur les hauteurs, mais compliquerait les mesures de rugosité.

### 2.3.2 Couleur de l'encre

La Figure B.1 23 donne les résultats en hauteurs atteints pour les quatre encres considérées. En moyenne, on voit que c'est l'encre magenta qui réalise les meilleurs scores, même à la fréquence plus élevée : c'est-à-dire que les hauteurs mesurées pour l'encre magenta sont les plus proches de la commande. De manière générale, on constate que toutes les encres présentent des hauteurs mesurées inférieures à la hauteur adressée. Cela ne signifie pas forcément qu'elles réagissent mal, mais plutôt que les tailles de niveaux de gouttes données par l'entreprise comme fixes quelle que soit l'encre utilisée ne sont qu'indicatives : une goutte magenta est peut-être plus épaisse qu'une goutte cyan. L'encre magenta étant un peu plus fluide que les autres, il ne serait pas étonnant qu'à taille de goutte supposée égale, un peu plus de magenta se dépose en réalité sur le support. La hauteur atteinte en elle-même n'est donc pas forcément intéressante. En revanche, la dispersion des mesures ainsi que la hauteur maximale des bandes donnent deux informations pertinentes :

- La dispersion la plus faible est obtenue pour l'encre jaune, suivie de l'encre cyan. Cela signifie que d'une bande à une autre (les résultats étant moyennés sur 2 à 6 bandes par profil, et sur trois profils par patch), on observe moins de variations dans les hauteurs atteintes pour ces deux encres. Encore une fois, la viscosité des encres explique possiblement ce résultat.
- La hauteur maximale des bandes est nettement plus faible pour les encres cyan et noire. Ce paramètre est la conséquence de deux effets différents. Tout d'abord, en superposant des gouttes d'encre sur un relief donné, à une certaine vitesse, on crée nécessairement un effet d'accumulation en certains endroits : la probabilité que la goutte, éjectée à la vitesse  $\vec{v}_1$ , tombe à la verticale, alors que le chariot se déplace à la vitesse  $\vec{v}_2$ , est très faible. En second lieu, lorsqu'elles sèchent, les gouttes se déforment. L'aspect de la déformation dépend de la température à laquelle le séchage a lieu, mais aussi de la viscosité initiale des encres. Dans un article de 2007, Soltman & Subramanian relient ces effets à la température à laquelle les gouttes d'encre sont éjectées [100] : changer le dispositif de séchage UV ou encore modifier la forme des gouttes éjectées pourrait résoudre ce problème.

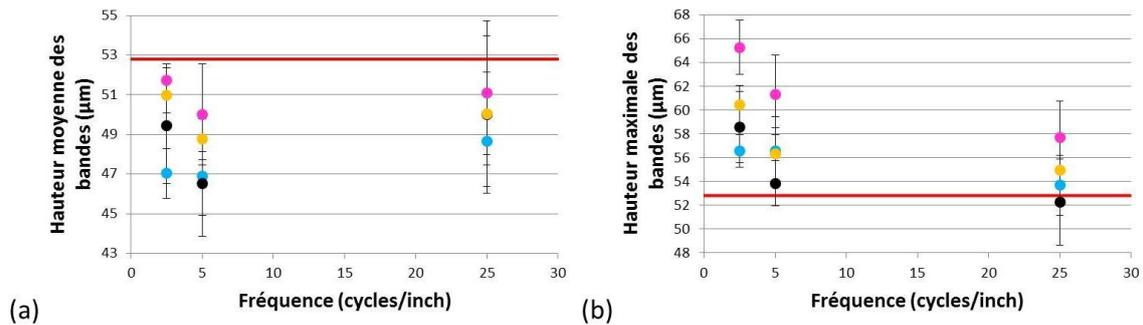


Figure B.1 23 – (a) Hauteur moyenne des bandes en fonction de la fréquence, pour les encres cyan, magenta, jaune et noire, au temps d’exposition aux UV minimal et au niveau de goutte 3. (b) Hauteur maximale des bandes en fonction de la fréquence, pour les encres cyan, magenta, jaune et noire, au temps d’exposition aux UV minimal et au niveau de goutte 3. Le trait rouge correspond aux hauteurs demandées tandis que les points correspondent aux hauteurs mesurées.

	Taille moyenne des gouttes (µm)
Cyan	4.70
Magenta	5.17
Jaune	5.09
Noir	4.94

Table B.1 9 – Taille réelle des gouttes, pour chacune des encres, déduite des hauteurs moyennes des bandes mesurées à la fréquence 2.5 cycles / pouce – sachant que 10 couches ont été imprimées dans tous les cas. Le niveau de goutte 3 était donné à 5.28 µm.

Nous éliminons ainsi l’encre magenta, trop fluide et difficile à mesurer, ainsi que l’encre noire, également difficile à mesurer. On travaillera avec l’encre cyan pour le reste de l’étude.

### 2.3.3 Temps d’exposition aux UV

Les résultats de la Figure B.1 24 ne permettent pas de conclure : changer le temps d’exposition aux UV ne change pas les performances en hauteur de l’encre cyan. A 25 cycles / pouce, la dispersion des mesures est importante : aucune tendance ne se dégage. Nous ne pouvons émettre de recommandation du point de vue des hauteurs ; travailler au temps minimal reste cohérent.

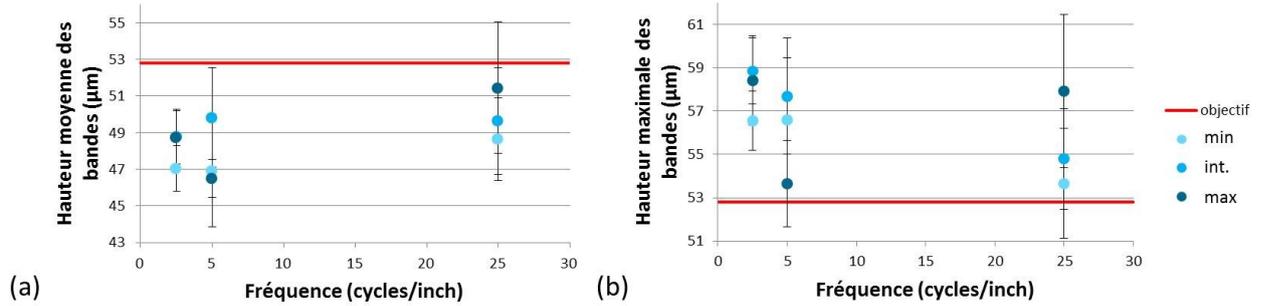


Figure B.1 24 – (a) Hauteur moyenne des bandes en fonction de la fréquence, pour l’encres cyan au niveau de goutte 3. (b) Hauteur maximale des bandes en fonction de la fréquence, pour l’encres cyan au niveau de goutte 3. Les temps d’exposition aux UV varient.

### 2.3.4 Taille des gouttes

Aux fréquences choisies, les résultats de la Figure B.1 25 montrent deux tendances. Aux tailles de gouttes 3 et 5 (respectivement annoncées comme 5.28 et 8.8 μm), si comme nous l’avons vu précédemment, la hauteur moyenne commandée n’est pas tout à fait atteinte, elle a tendance à augmenter avec la fréquence. Au contraire, à taille de goutte 1 (c’est-à-dire 1.76 μm), la hauteur maximale baisse légèrement quand la fréquence augmente. Les écarts restent modérés. L’expérience nous permet de donner les hauteurs réelles des gouttes (voir Table B.1 10).

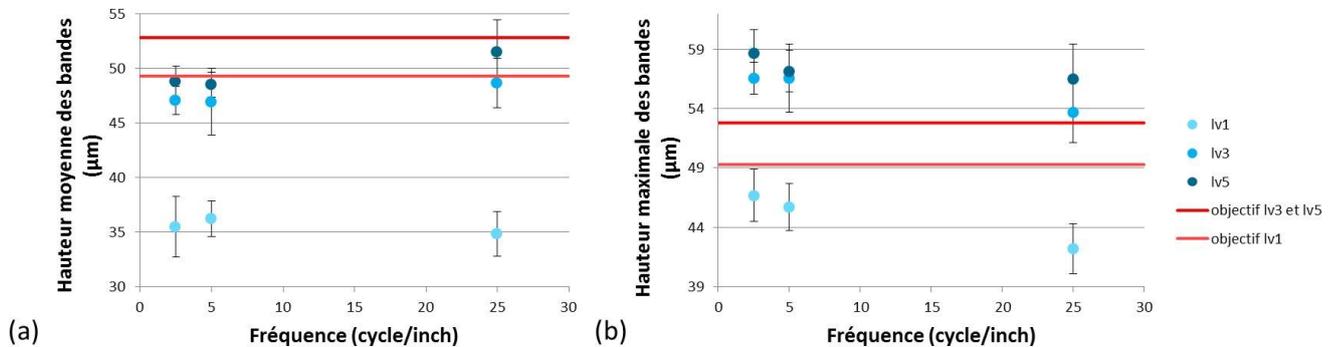


Figure B.1 25 – (a) Hauteur moyenne et (b) hauteur maximale des bandes en fonction de la fréquence, pour l’encres cyan au temps d’exposition aux UV minimal. La taille des gouttes utilisées varie.

	Hauteur moyenne des bandes ( $\mu\text{m}$ )	Taille moyenne des gouttes ( $\mu\text{m}$ )
Lv 1	35.5	1.27
Lv 3	47.0	4.70
Lv 5	48.8	8.13

Table B.1 10 – Taille réelle des gouttes, pour chacune des encres, déduite des hauteurs moyennes des bandes mesurées à la fréquence 2.5 cycles / pouce – sachant que 28 couches ont été imprimées à la taille 1, 10 couches à la taille 3 et 6 couches à la taille 5. Pour rappel, le niveau de goutte 5 était donné à 8.8  $\mu\text{m}$ .

### 2.3.5 Direction d'impression

Dans la direction 1 (D1), les patches ont été imprimés selon le sens du chariot : on imprime donc des bandes horizontales. Dans la direction 2 (D2), l'autre sens a été choisi : on imprime donc des bandes verticales. Aux fréquences faibles, on ne voit pas de différence entre les deux directions, mais à fréquence plus élevée (ici 25 cycles / pouce), la Figure B.1 26 montre que les hauteurs moyenne et maximale atteintes chutent lorsque le patch est imprimé dans la direction 2. La direction 1 est bien la direction d'impression privilégiée.

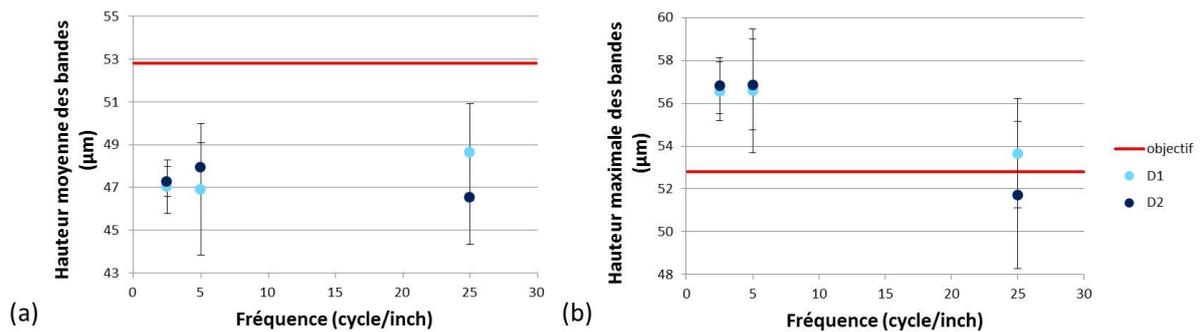


Figure B.1 26 – (a) Hauteur moyenne et (b) hauteur maximale des bandes en fonction de la fréquence, pour l'encre cyan au temps d'exposition aux UV minimal, pour les deux directions d'impression.

## 2.4 Conclusions

### 2.4.1 Conditions d'expérience optimales

Compte tenu des résultats des tests présentés dans cette partie, qui portaient sur le type d'encre, la direction d'impression, l'exposition aux UV et le niveau de goutte, les variables mesurées étant le niveau de brillant, la rugosité des surfaces et les hauteurs atteintes, nous avons sélectionné les paramètres qui semblaient les plus pertinents pour « faire du mat ». Ils sont donnés par le tableau suivant.

Encres	Temps d'exposition aux UV	Direction d'impression	Taille des gouttes
cyan	5 – minimal	1 – sens du chariot	1
magenta	7 – intermédiaire	2 – sens contraire	3
jaune	9 – maximal		5
noir			
blanc			
vernis			

Table B.1 11 – Paramètres d'intérêt.

### 2.4.2 Limites

Il nous reste à préciser que la limite principale va se trouver dans la résolution de l'imprimante, plutôt que dans la gestion des paramètres, qui offrent finalement de grandes possibilités de variations. Mais puisque la résolution de l'imprimante est fixée à 450 pixels / pouce, ce qui équivaut à un point tous les 56,4  $\mu\text{m}$ , une plus grande finesse de détail n'est pas accessible.

## 3. Défi de la gestion de l'apparence pour les technologies additives

Dans un travail mené entre 2013 et 2016 sur le même procédé d'impression en relief, Baar était arrivé aux recommandations suivantes pour gagner en matité :

- pour obtenir un rendu mat, un mode multi-passes pouvait être utilisé : chacune des passes permettait le dépôt d'une fraction d'encre. Au lieu de déposer toute l'encre d'un coup, celle-ci était placée zone par zone (sur un plan XY, et non le long d'une troisième dimension). Baar indique que la différence de temps de séchage entre les gouttes rend l'imprimé plus mat. [99]
- Baar indique qu'un temps d'exposition aux UV long donne une surface plus mate. Nous avons vu dans la partie précédente que ce n'était vrai que quand plusieurs couches étaient superposées, et pas pour toutes les encres. [99]
- Le reste du travail est plus porté sur l'augmentation du gloss (par l'ajout de vernis notamment) que sur sa réduction.

A part ce travail antérieur au notre, les études sur le mat en impression en relief sont inexistantes. Le mode « mat » correspond la plupart du temps simplement à une impression sans vernis. Il faut dire que les procédés 3D ne se prêtent pas aux méthodes usuelles pour « faire du mat », ni d'ailleurs pour faire du brillant. Alors comment rendre la gestion de l'apparence des surfaces possibles ? Dans la Partie 1 de ce travail, nous avons évoqué différents moyens utilisés dans l'industrie classique pour matifier les objets. Ces méthodes sont reprises par la Table B.1 12 dans laquelle nous évoquons les capacités de notre système.

Le sablage n'est pas envisageable, car nous ne pouvons pas modifier la dernière couche qui contient l'information couleur. Même chose pour le matage à l'acide, dangereux et totalement inadapté au matériau « encre ». Par contre, jouer sur la concentration pigmentaire dans le liant serait envisageable : mais ce n'est pas de notre ressort, puisque nous ne pouvons modifier la composition des encres. Nous ne pouvons pas non plus ajouter un agent matant à l'encre, pour la même raison. Il nous reste deux solutions :

- Recouvrir d'un produit matant : vernis mat par exemple. Mais le problème est que cette solution modifierait les couleurs, et implique une étape de finition.
- Insérer une microrugosité : créer grâce au procédé additif une couche intermédiaire qui contiendra une rugosité donnant un rendu mat. C'est cette solution que nous retiendrons, car elle s'insère simplement dans un processus d'impression.

Procédé	Faisabilité ?
Ajouter une substance matante.	Nous ne pouvons pas modifier les encres.
Recouvrir d'un produit matant.	Faisable.
Jouer sur la concentration pigmentaire.	Nous ne pouvons pas modifier les encres.
Mater à l'acide.	Impossible sur des encres.
Sabler.	Impossible sur des encres.
Insérer une microrugosité.	Faisable.

Table B.1 12 – Méthodes pour « faire du mat » et faisabilité en impression 2.5D.

## 4. Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre un système d'impression particulier : l'impression en relief ou impression « 2.5D ». Ce procédé additif crée, par empilement successif de couches d'encre, des surfaces finement texturées et colorées, ce qui est encore impossible avec les procédés 3D plus conventionnels.

De nombreux paramètres régissent le processus d'impression. En fixant la couleur de l'encre au cyan, en orientant préférentiellement les imprimés dans le sens du mouvement du chariot et en fixant le temps de séchage au niveau le plus court, on réduit le système d'étude à l'unique variable « taille de goutte ». La goutte a deux contraintes : son étalement en x et y ainsi que sa hauteur en z. L'étalement est fonction de la taille en z. En mentionnant la « taille » ou le « niveau de goutte », nous signifions donc toujours la hauteur en z, comme indiqué ici en partie 1.3.2.4.

La contrainte principale de ce système reste la résolution numérique, fixée à 450 pixels / pouce, ce qui signifie un détail minimal de 56 µm de côté. Cela ne suffira pas à reproduire des rugosités réelles, mais nous permettra quand même de créer des microrugosités pour réduire le niveau de brillant des imprimés.

De nombreuses questions apparaissent à présent. Nous les traiterons dans le cas de l'impression 2.5D, mais elles restent transposables à tout système 3D couleur.

- En relief, peut-on aller plus loin ? En particulier, quelle métrique utiliser pour quantifier précisément les possibilités de l'imprimante ? Peut-on améliorer la réponse en hauteurs de l'imprimante ?

- Peut-on s'éloigner des valeurs de brillant spéculaire mesurées ici pour des couches d'encre simples, qui sont assez uniformes et donnent un aspect « plastique » aux imprimés ? Quelles microrugosités insérer pour « gagner en mat » ?

- La couleur, calibrée pour un système plat, sera-t-elle maintenue pour un système en relief ?

Les chapitres suivants apportent quelques éléments de réponse.

## Chapitre B.2. Relief des imprimés

Nous venons de définir dans le chapitre B.1 le procédé d'impression en relief. Nous avons listé les paramètres qui entraînent en jeu dans la création d'un relief coloré d'une certaine épaisseur, formé de la superposition de plusieurs couches d'encre : en particulier, nous avons vu que l'influence de la taille de goutte était déterminante. Les autres variables, temps de séchage sous UV ou direction d'impression, ont été fixées respectivement au temps de séchage minimum et à la direction d'impression principale.

Pour imprimer des surfaces mates, nous avons aussi vu que la seule solution dont nous disposions était de créer des micro-structures afin d'augmenter la rugosité des surfaces et donc de diminuer leurs aspects brillants. La taille minimale de ces structures est limitée à la résolution de l'imprimante, qui vaut 450 pixels / pouce dans notre cas (soit un détail minimal de 56  $\mu\text{m}$  de côté). Mais l'imprimante sera-t-elle capable d'imprimer des structures en relief de cet ordre de grandeur ?

Pour répondre à cette question, nous analysons dans ce chapitre les performances en hauteurs de l'imprimante. Ce qui ouvre une nouvelle discussion : quel outil utiliser pour effectuer cette analyse ? Quelle métrique permet de quantifier précisément les possibilités d'une imprimante en termes de relief ? Et si ces possibilités ne sont pas satisfaisantes, comment les améliorer ?

# 1. Méthodes d'analyse

## 1.1 Méthodes connues

Comment décrire les performances d'un système en relief ? Plusieurs facteurs vont entrer en jeu : la fréquence spatiale et les hauteurs des reliefs créés, ainsi que les paramètres propres à l'impression (taille des gouttes notamment). En traitement du signal, la **fonction de transfert** est l'outil qui décrit le fonctionnement d'un système, en analysant sa sortie par rapport à une entrée donnée. La fonction de transfert s'applique à un système linéaire : ce point doit être discuté dans le cas d'un procédé d'impression. En optique, la **fonction de transfert de modulation** est un outil qui donne le contraste et la résolution d'un système. Le principe de cette méthode est d'analyser la réponse d'un système (optique) lorsqu'on lui présente une mire formée par l'alternance de bandes noires et blanches, telle que le contraste de la mire vaut 1, et dont l'espacement entre les bandes (la fréquence spatiale) varie (voir Figure B.2 1).



Figure B.2 1 – Exemple de mire utilisée pour le calcul de la fonction de transfert de modulation optique.

## 1.2 Fonction de transfert de modulation (FTM)

### 1.2.1 Définition en optique

On considère un système optique comme un filtre linéaire passe-bas pour les fréquences spatiales : les hautes fréquences sont mal transmises. Théoriquement, un système optique est décrit par la **Fonction de Transfert Optique** (*Optical Transfer Function, FTO*), qui est la transformée de Fourier de l'image donnée par le système d'un point source (*Point Spread Function, PSF*, ou réponse percussionnelle).

La FTO est une fonction complexe. Elle s'écrit donc comme :

$$FTO(\nu) = |FTO(\nu)| \times e^{i\phi(\nu)} \quad (E2.1)$$

Par définition, le module de la FTO est appelée **Fonction de Transfert de Modulation** (*Modulation Transfer Function, FTM*) :

$$|FTO(v)| = FTM(v) \quad (E2.2)$$

La phase de la FTO,  $\phi(v)$ , est appelée transfert de phase d'un système optique. La FTM est paire et normalisée telle que  $FTM(0) \equiv 1$ . Elle décrit les performances d'un système optique car elle donne une mesure directe et quantitative de la qualité de l'image obtenue et un retour sur la capacité du dit-système à transférer divers niveaux de détails de l'objet considéré à l'image.

### 1.2.2 Ecriture dans l'espace de Fourier

Pour un système optique formant l'image d'un objet, on peut écrire :

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) \quad (E2.3)$$

où  $g$  est la fonction décrivant l'image perçue, définie comme la convolution entre  $f$  l'objet en entrée du système et  $h$  la réponse impulsionnelle du système. Dans l'espace de Fourier, l'équation (E2.3) devient :

$$G(u, v) = H(u, v) \times F(u, v) \quad (E2.4)$$

$H$  correspond alors à la FTO, définie telle que :

$$FTO \equiv H(u, v) = |H(u, v)|e^{-j\theta(u,v)} \quad (E2.5)$$

et dont le module est toujours la FTM :

$$|H(u, v)| = FTM(u, v) \quad (E2.6)$$

En fonction des fréquences  $v$ , on trouve également dans la littérature l'expression [101] :

$$FTM(v) = \frac{M \text{ image capturée}(v)}{M \text{ image originale}(v)} \quad (E2.7)$$

avec

$$M = \text{Modulation} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (E2.8)$$

$I_{max}$  et  $I_{min}$  correspondent respectivement à l'intensité maximale et à l'intensité minimale détectée sur l'image fournie par le système optique.

### 1.2.3 Calcul pratique

En optique, le système fait l'acquisition d'un objet physique et en donne une image physique ou numérique. Pour calculer la FTM, une mire sinusoïdale ou rectangulaire du type de celle présentée Figure B.2 1 est utilisée comme objet.

Pour une mire sinusoïdale, à une fréquence  $\nu$  donnée, les contrastes objet et image s'écrivent :

$$\text{Contraste Objet} = \frac{I_{\max \text{ objet}} - I_{\min \text{ objet}}}{I_{\max \text{ objet}} + I_{\min \text{ objet}}} = 1 \quad (\text{E2.9})$$

$$\text{Contraste Image} = \frac{I_{\max \text{ image}} - I_{\min \text{ image}}}{I_{\max \text{ image}} + I_{\min \text{ image}}} < 1 \quad (\text{E2.10})$$

Le contraste image est forcément de moins bonne qualité que le contraste objet. Sa valeur est donc inférieure à 1. La FTM s'écrit donc :

$$FTM(\nu) = \frac{\text{Contraste Image}}{\text{Contraste Objet}} < 1 \quad (\text{E2.11})$$

La mesure doit être répétée pour plusieurs fréquences  $\nu$  afin d'obtenir une représentation de la FTM.

Dans le cas d'une mire rectangulaire, on calcule la **fonction de transfert de contraste (FTC)** exactement de la même manière. FTC et FTM sont reliées par les formules de Coltman [102] :

$$FTC(\nu) = \frac{4}{\pi} \left[ FTM(\nu) - \frac{FTM(3\nu)}{3} + \frac{FTM(5\nu)}{5} - \frac{FTM(7\nu)}{7} + \dots \right] \quad (\text{E2.12})$$

et

$$FTM(\nu) = \frac{\pi}{4} \left[ FTC(\nu) + \frac{FTC(3\nu)}{3} - \frac{FTC(5\nu)}{5} + \frac{FTC(7\nu)}{7} - \dots \right] \quad (\text{E2.13})$$

La Figure B.2 2 illustre la différence entre FTC et FTM.

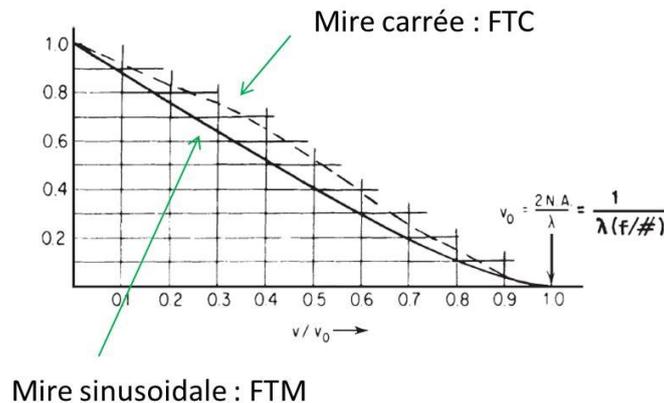


Figure B.2 2 – Allures comparées des FTM et FTC, dans les cas respectifs d'une mire sinusoïdale et d'une mire rectangulaire. [103]

### 1.3 Cas de l'impression

La configuration d'un processus d'impression est illustrée Figure B.2 3. Contrairement à un cas optique, l'image d'entrée est virtuelle ; l'image de sortie est créée par un procédé physique relativement complexe. On estime ici que la FTM va prendre en compte la totalité du procédé d'impression.



Figure B.2 3 – Procédé d'impression. Le système prend en entrée une image numérique, qu'il convertit en un imprimé.

La FTM (comme la FTC) sont des méthodes d'analyses classiques dans l'industrie de l'impression [104, 105, 106]. Elles sont particulièrement adaptées puisqu'elles permettent l'examen conjoint de la fréquence spatiale et du contraste, deux paramètres importants dans l'impression. Le premier – la fréquence spatiale – renseigne sur la capacité de l'imprimante à reproduire ou non des fréquences élevées ; le second – le contraste – renseigne sur la capacité de l'imprimante à produire un noir et blanc satisfaisant.

Différentes méthodes de mesure existent pour le calcul de la FTM ou de la FTC de systèmes d'impression. Trois types de mires existent : à bords inclinés (*slanted-edge*), à sinusoides (*sine-wave*) et à grilles carrées (*bar or square patterns*) [101]. Avec les mires sinusoidales, on applique le calcul de FTM décrit précédemment (on peut aussi passer directement par l'analyse de Fourier). Avec une mire à barres, on calcule la FTC avant de convertir en FTM via les formules de Coltman.

Jang & Allebach [107] proposent une méthode pour caractériser une imprimante en fonction de la couleur d'impression. Leur FTM est définie dans l'espace de Fourier comme le ratio d'une réponse en fréquence et de la différence de couleur  $\Delta E$ . Bonnier & Lindner [103] ajoutent que la FTM, pour être complète, doit être calculée pour différents biais, couleurs, fréquences, orientations, modulations. Ils écrivent alors :

$$FTM(\nu) = \frac{A_{out}(\nu)}{A_{in}(\nu)} \quad (E2.14)$$

pour une modulation spatiale en une dimension où  $A$  désigne une valeur d'absorbance déduite des coordonnées CIE XYZ.

Hasegawa et al. [108] calculent la FTC en scannant les mires, et, supposant le système linéaire, appliquent les formules de Coltman pour retrouver la FTM. Baar [99] utilise la formule (E2.7) pour comparer les FTM de différents systèmes d'impression en 2D.

Pour résumer, la FTM d'un système d'impression 2D est obtenue à partir d'une mire périodique blanche et noire :

- Par calcul direct si la mire est sinusoidale.
- Par calcul de la FTC et conversion en FTM si la mire est rectangulaire.

## 1.4 Intérêt de la FTM : rétroaction

L'intérêt majeur de la FTM est que cet outil permet de compenser les erreurs mesurées du système, si l'on sait ou si l'on suppose le système linéaire. D'après Bonnier *et al.* [109], la correction des erreurs lors de l'impression est possible grâce à la FTM. On effectue alors une rétroaction (Figure B.2 4).

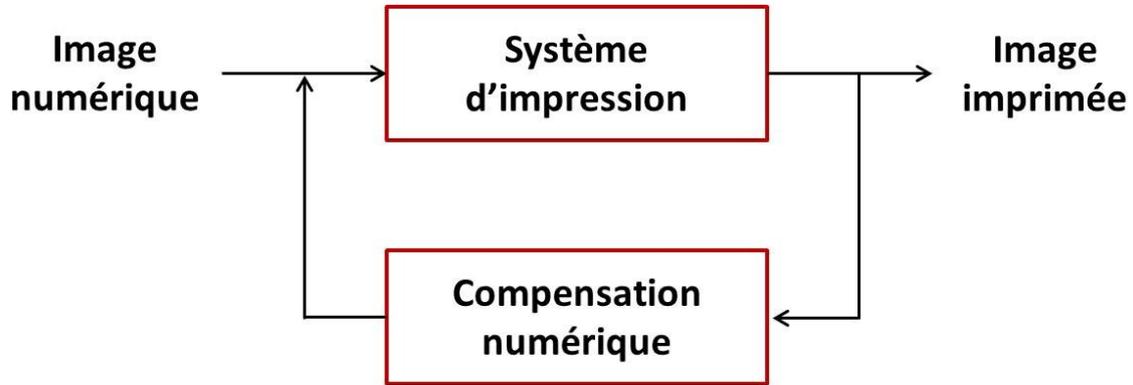


Figure B.2 4 – Rétroaction.

L'implémentation de la rétroaction se fait dans le domaine de Fourier. Le signal de sortie s'écrit en fonction du signal d'entrée comme :

$$G(u, v) = FTM \times F(u, v) \quad (E2.15)$$

où  $G(u, v) = \mathcal{Fourier}(g(x, y)) = \mathcal{Fourier}(sortie)$  et  $F(u, v) = \mathcal{Fourier}(f(x, y)) = \mathcal{Fourier}(entrée)$ . Idéalement, on veut que le signal de sortie soit similaire au signal d'entrée, soit

$$\mathcal{Fourier}(sortie\ idéal) = FTM \times \mathcal{Fourier}(entrée\ compensée) \quad (E2.16)$$

$$\mathcal{Fourier}(entrée\ compensée) = \frac{\mathcal{Fourier}(sortie\ idéal)}{FTM} \quad (E2.17)$$

Par déconvolution dans l'espace de Fourier, l'image compensée d'entrée s'écrit :

$$entrée\ compensée = \mathcal{Fourier}^{-1}\left(\frac{\mathcal{Fourier}(sortie\ idéal)}{FTM}\right) \quad (E2.18)$$

La « sortie idéale » étant un signal rectangulaire parfait, c'est-à-dire le signal d'entrée précédent.

Pour supprimer le bruit, on peut choisir d'appliquer un filtre de Wiener. On écrit alors :

$$entrée\ compensée = \mathcal{Fourier}^{-1}\left(\frac{\mathcal{Fourier}(entrée)}{FTM} \times \frac{FTM \times FTM^*}{FTM \times FTM^* + RSB}\right) \quad (E2.19)$$

où  $RSB$  est le **rapport signal sur bruit** (*Signal to Noise Ratio*, SNR).

## 1.5 Que faire pour analyser les hauteurs ?

Tout ce que nous avons dit jusqu'à présent est valable pour l'analyse d'images en deux dimensions. Dans notre cas, nous ajoutons une troisième dimension : la hauteur. On choisit de scinder la notion de FTM en deux fonctions distinctes :

- La FTM (ou FTC) classique telle qu'elle est utilisée pour évaluer les performances d'une imprimante dans le plan  $(x, y)$  ;
- Une nouvelle fonction de modulation qui servira à quantifier les performances de l'imprimante dans un plan de coupe  $(x, z)$  ou  $(y, z)$ .

Nous appelons cette nouvelle fonction la **FTMH : Fonction de Transfert de Modulation en Hauteurs** (*Heights Modulation Transfer Function*, HMTF). Nous souhaitons qu'elle exprime les performances de l'imprimante en hauteurs, en fonction des fréquences d'impression. Par analogie, au lieu de mesurer un contraste optique, on propose ici de mesurer un écart en hauteurs. Nous nous penchons sur son établissement et son analyse dans les parties qui suivent. Par analogie, l'équation (E2.3) s'écrit ici :

$$g(x, z) = h(x, z) * f(x, z) \quad (E2.20)$$

où  $f$  désigne les hauteurs en entrée de système,  $g$  les hauteurs en sortie de système et  $h$  est la fonction qui décrit l'imprimante, et dont le module de la transformée de Fourier vaut la FTMH.  $x$  correspond à la direction 1, celle du mouvement du chariot,  $y$  correspond à la direction 2, perpendiculaire au mouvement du chariot, et  $z$  est la normale (voir chapitre B.1 pour les directions illustrées).

## 2. Protocole expérimental

Le but de notre expérience est de quantifier l'influence des fréquences d'impression sur la qualité du relief obtenu. Aux fréquences, nous allons ajouter une seconde variable : la taille de gouttes. Nous allons donc faire varier conjointement fréquences spatiales, hauteurs en entrée et tailles de gouttes.

### 2.1 Echantillons

On construit des plaquettes imprimées où les fréquences et les hauteurs varient. Chaque plaquette est formée de 72 patches, imprimés à une même taille de goutte. Chaque patch est donc associé à une fréquence connue, à un couple de hauteurs spécifiques et à une taille de gouttes déterminée. Les patches sont formés de barres rectangulaires : nous choisissons la forme rectangulaire comme la plus simple à imprimer. Afin d'évaluer la répétabilité de l'imprimante et d'obtenir un résultat plus fiable, on imprimera les matrices géantes 3 fois chacune, après avoir systématiquement nettoyé les têtes d'impression. Les variables sont donc les suivantes :

- 8 fréquences (5, 10, 15, 25, 30, 50, 75 et 90 paires de lignes par pouce – voir Figure B.2 5) ;
- 9 couples de hauteurs ;
- 3 niveaux de gouttes (1, 3 et 5, soit respectivement 1.76, 5.28 et 8.8  $\mu\text{m}$ ) ;
- Tout ceci répété 3 fois.

Ce qui nous donne 9 plaquettes et 648 patches à analyser. Ces imprimés sont réalisés selon le processus d'impression classique : relief construit avec toutes les encres, puis couche blanche, puis couche d'encre cyan. La hauteur totale des bandes hautes de l'ensemble est notée  $H_{max}$ , la hauteur minimale  $H_{min}$  (voir Figure B.2 6). Le temps de séchage sous UV est fixé à son minimum. Les bandes sont imprimées dans la direction principale du chariot.

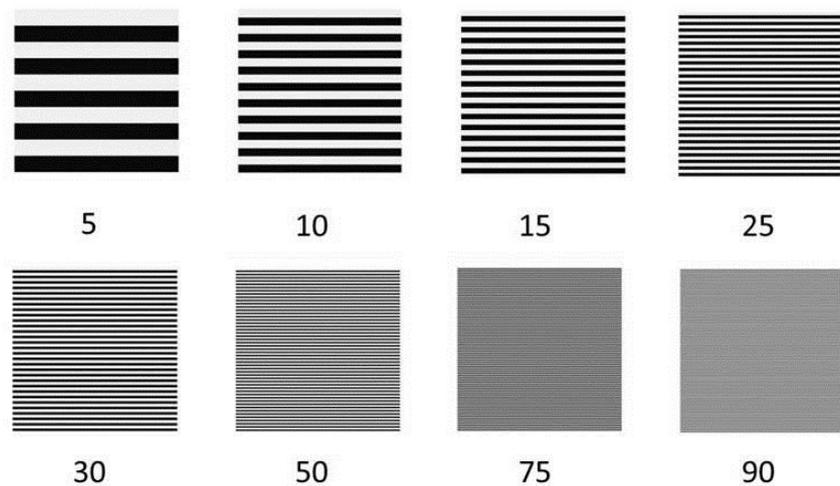


Figure B.2 5 – Fréquences d'étude. Les fréquences sont données par cycles (ou paires) par pouce. Une paire correspond à une alternance blanc / noir. L'orientation des bandes correspond à la direction d'impression principale.

On choisit de faire varier à la fois les hauteurs des zones basses et les hauteurs des zones hautes. Les couples de hauteurs ( $H_{max}; H_{min}$ ) sont choisis de façon à ce que le niveau de gris soit un entier numérique. Ils sont donnés Table B.2 1. La hauteur maximale est fixée à 200  $\mu\text{m}$  pour que le capteur de la microtopographie l'atteigne toujours (gamme 0 – 300  $\mu\text{m}$ ).

cas n°	$H_{min}$ ( $\mu\text{m}$ )	$H_{max}$ ( $\mu\text{m}$ )	$H_{max} - H_{min}$ ( $\mu\text{m}$ )
1	15.7	27.4	11.7
2	160.0	188.2	28.2
3	106.7	139.6	32.9
4	32.9	77.6	44.7
5	42.3	96.5	54.2
6	48.6	107.4	58.8
7	0.0	78.4	78.4
8	110.6	200.0	89.4
9	59.6	187.4	127.8

Table B.2 1 – Couples de hauteur ( $H_{max}; H_{min}$ ), triés par ( $H_{max} - H_{min}$ ) croissants.

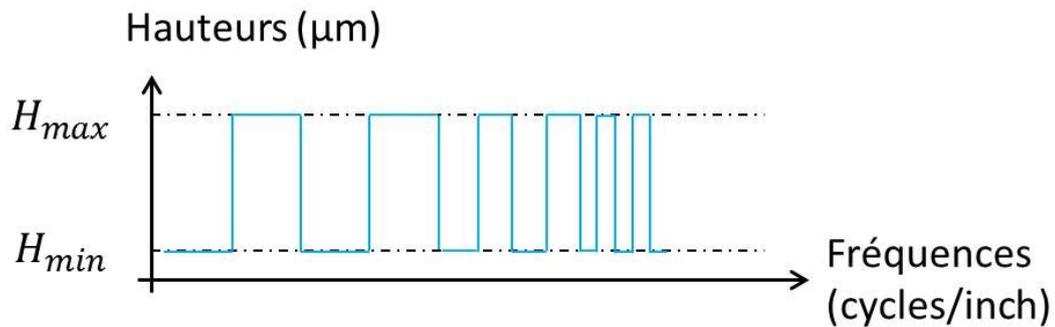


Figure B.2 6 – Hauteurs  $H_{max}$  et  $H_{min}$  en entrée du système.

## 2.2 Impression

Avant chaque session d'impression, un nettoyage des têtes est effectué. Un calibrage des têtes a également été effectué avant la troisième session d'impression. L'aspect des plaquettes est donné Figure B.2 7.

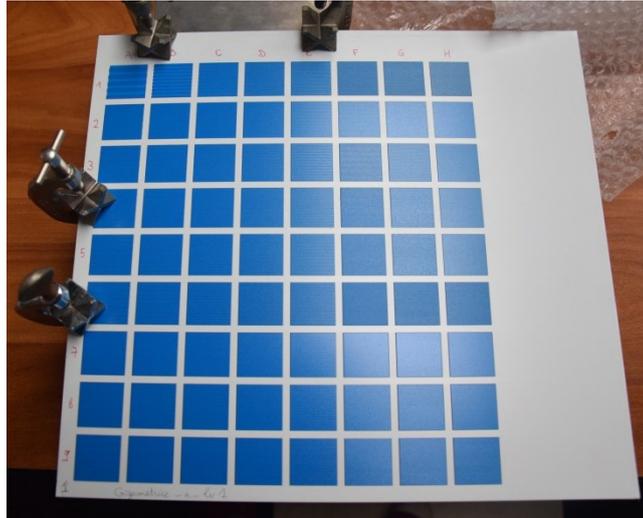


Figure B.2 7 – Aspect des matrices géantes. Chaque patch correspond à une fréquence et un couple de hauteurs donnés. Ici, le niveau de goutte est à 1.

### 2.3 Mesure des hauteurs

La mesure des hauteurs est effectuée au moyen de la station de microtopographie du C2RMF<sup>7</sup>. La sonde utilisée possède une gamme de mesure de 300  $\mu\text{m}$ . Le pas de mesure est fixée à 1  $\mu\text{m}$ . Selon la fréquence spatiale des patches, on adapte la longueur du profil mesuré, de 3 à 10 mm. Les mesures sont rapides : 35 secondes pour les profils de longueur 10 mm.

Trois profils sont mesurés par patches, ce qui équivaut à  $3 \times 648 = 1944$  mesures à effectuer. La mesure des hauteurs  $h_{max}$  et  $h_{min}$  après impression est ensuite effectuée sur Mountains Map 6.2<sup>TM</sup>, logiciel développé par la société Digital Surf<sup>TM</sup>. Elles sont calculées en référence à une ligne de base, placée soit au niveau du support (*ref1* sur la Figure B.2 8, en bas), soit au niveau d'une des bandes basses (*ref2* sur la Figure B.2 8, en bas). Dans le premier cas, on obtient les hauteurs de toutes les bandes relativement au niveau de la plaquette (qui fait office de zéro) ; dans le second cas, on obtient directement la différence de hauteur entre les bandes haute et basse considérées. Les hauteurs de plusieurs bandes sont mesurées puis tous les résultats sont moyennés. D'autres paramètres peuvent être mesurés, comme la largeur des bandes, en haut ( $L_1$ ) et en bas ( $L_2$ ) ou l'écart en hauteur en haut des bandes ( $R$ ). Ils sont illustrés par la Figure B.2 8.

<sup>7</sup> Ces mesures ont été effectuées en 2016 au moyen du capteur CHN-150.

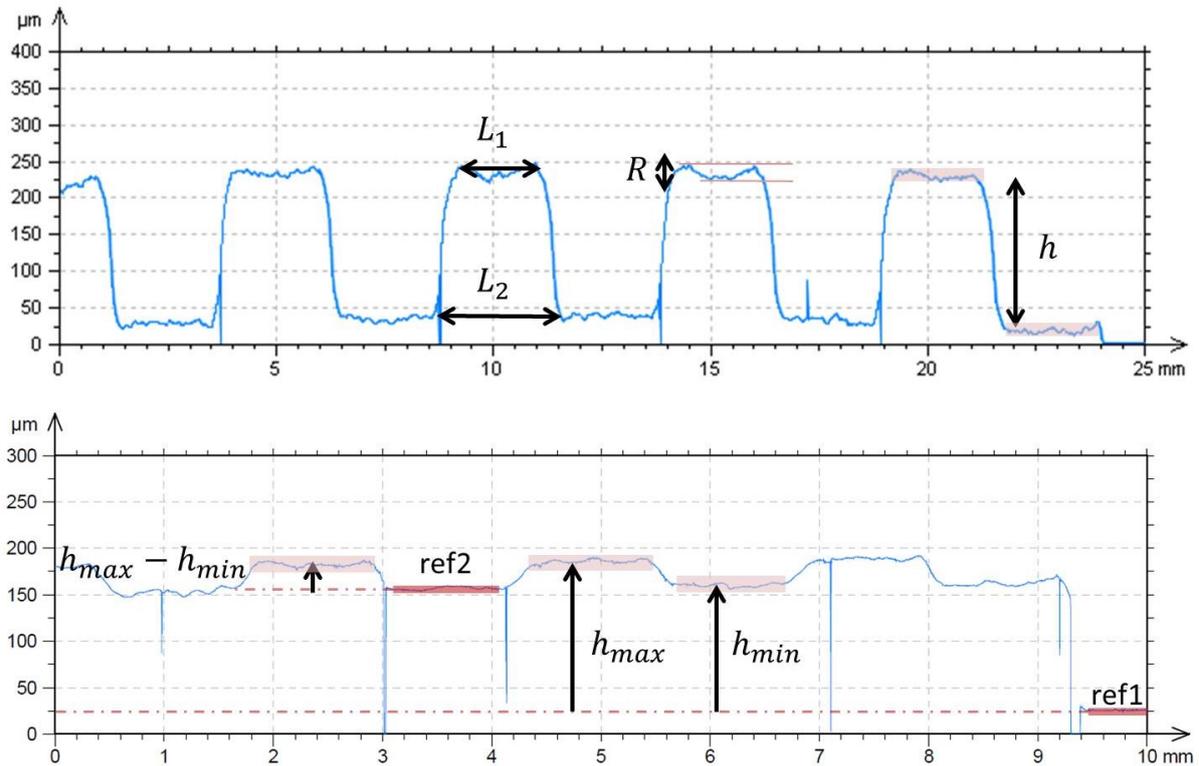


Figure B.2 8 – Calcul de différents paramètres sur Mountains Map 6.2™.

## 2.4 Calcul de la FTMH

Par analogie avec les cas optiques, on calculera la FTMH de la manière suivante, pour une fréquence spatiale donnée :

$$FTMH(\nu) = \frac{\text{modulation (sortie)}(\nu)}{\text{modulation (entrée)}(\nu)} \quad (\text{E2.21})$$

avec

$$\text{modulation (entrée)} = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max} + H_{min}} \quad (\text{E2.22})$$

et

$$\text{modulation (sortie)} = \frac{h_{max} - h_{min}}{h_{max} + h_{min}} \quad (\text{E2.23})$$

On a vu comment étaient mesurés  $h_{max}$  et  $h_{min}$  sur les profils extraits en microtopographie.  $H_{max}$  et  $H_{min}$  ont été données Table B.2 1. On a toutes les données pour calculer les fonctions de transfert de modulation en hauteur, pour chaque fréquence spatiale et chaque taille de goutte.

On voit qu'au lieu de mesurer un contraste optique, on choisit de mesurer un écart en hauteurs. Sans passer par les formules de Coltman (qui sont valables dans le cas optique du

calcul de contraste sur une mire rectangulaire !), nous utiliserons ici uniquement la formule (E2.21).

### 3. Résultats

#### 3.1 Aspect des courbes

La Figure B.2 9 présente l'aspect de courbes acquises dans le cas des hauteurs n°4, pour une fréquence spatiale faible. Le signal d'entrée rectangulaire est signalé en pointillés. Les courbes rouge, bleue et verte correspondent respectivement aux profils extraits aux niveaux de gouttes 1, 3 et 5.

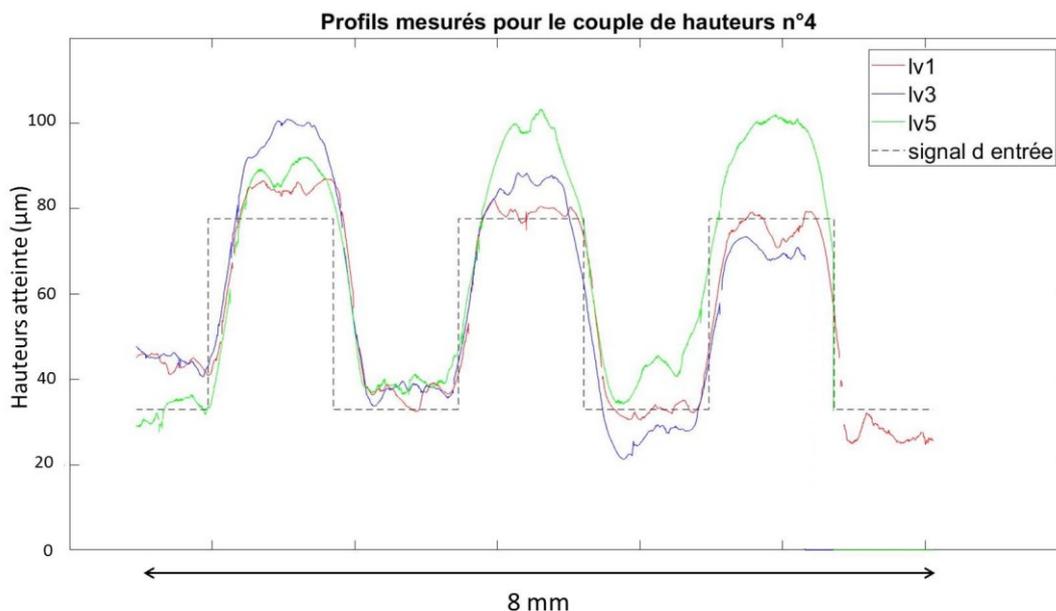


Figure B.2 9 – Aspect des courbes. Le signal rectangulaire en pointillés est adressé en entrée du système. Le profil réponse est donné en rouge au niveau de gouttes 1, en bleu au niveau de gouttes 3 et en vert au niveau de gouttes 5. La hauteur demandée est telle que  $H_{max} - H_{min} = 44.7$  et la fréquence est fixée à 15 cycles / pouce. Les profils ont été tracés sur une longueur de 8 mm.

Au niveau de gouttes le plus faible, 1, les écarts  $R$  en haut des bandes sont assez marqués, mais la forme générale du profil est bien rendue : le profil paraît bien rectangulaire. La largeur du haut de bande  $L_1$  est plus faible que la largeur de bas de bande  $L_2$ , mais la forme générale reste satisfaisante. Cet écart entre  $L_1$  et  $L_2$  se creuse pour les niveaux de gouttes 3 et 5. On peut donc d'ores et déjà dire que les niveaux de gouttes 3 et 5 ne respectent pas une partie du contrat : le relief créé n'a pas la forme exacte du relief désiré. En particulier au niveau de gouttes 5, le haut des bandes n'est pas du tout plat mais nettement bosselé. La courbe ressemble plus à une sinusoïde qu'à un créneau.

### 3.2 Hauteurs atteintes

Les graphes de la Figure B.2 10 présentent les hauteurs atteintes pour les trois niveaux de gouttes considérés, pour toutes les fréquences, dans le cas du couple de hauteurs n°4. On voit que la hauteur maximale est constamment dépassée, particulièrement quand le niveau de gouttes est élevé. Même chose pour la hauteur minimale. Il est probable que le mouvement du chariot entraîne un déplacement des gouttes d'encre, qui viennent tomber sur les bandes basses. En règle générale, la différence  $h_{max} - h_{min}$  correspond tout de même bien à ce qu'on avait demandé ; les performances ne chutent qu'à partir de 50 cycles / pouce. Le niveau de gouttes 1 donne les hauteurs les plus proches de la commande.

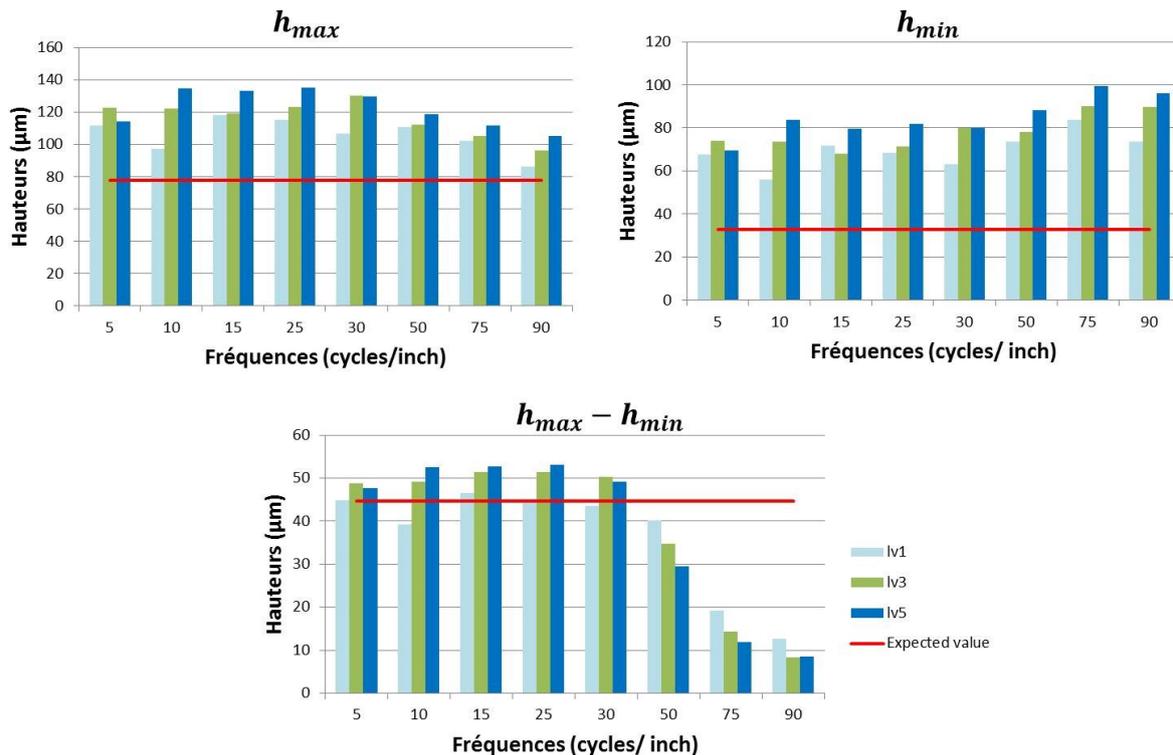


Figure B.2 10 – Hauteurs mesurées dans le cas du couple de hauteurs n°4 (tel que  $H_{max} - H_{min} = 44.7 \mu\text{m}$ ).

### 3.3 FTMH

Les graphes présentant les fonctions de transfert de modulation en hauteur sont donnés Figure B.2 12. Sur ces graphes, nous présentons à la fois les FTMH calculées (croix rouges au niveau de gouttes 1, ronds bleus au niveau de gouttes 3 et triangles verts au niveau de gouttes 5) et les courbes modèles passant par ces points. Nous choisissons une représentation en décibels appelée **diagramme de Bode**.

Les fonctions modèles utilisées pour la simulation sont de la forme suivante :

$$HMTF(\nu) = \frac{H_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^n}} \quad (\text{E2.24})$$

$H_0$  est appelé le gain,  $\nu_0$  la fréquence de coupure et  $n$  l'ordre du système. Les modèles sont optimisés de telle manière qu'ils minimisent une fonction de coût. Les valeurs de  $H_0$ ,  $\nu_0$  et  $n$  varient en fonction des couples de hauteurs implémentés et des niveaux de gouttes. Elles sont données Figure B.2 11.

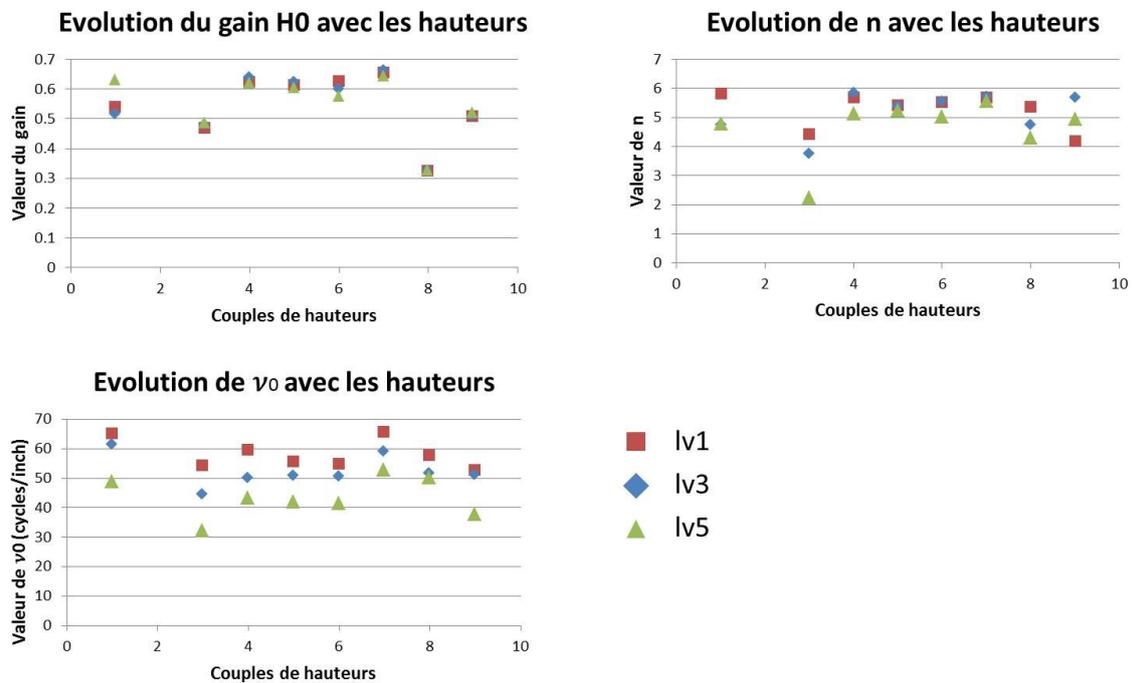


Figure B.2 11 – Evolution du gain  $H_0$ , de l'ordre  $n$  et de la fréquence de coupure  $\nu_0$  pour les 9 couples de hauteurs implémentées. En rouge, au niveau de gouttes 1, en bleu, au niveau de gouttes 3 et en vert, au niveau de gouttes 5. Les valeurs des trois paramètres dans le cas des hauteurs  $n^{\circ}2$  a été supprimée pour que les graphes soient lisibles.

Si  $H_0$  reste relativement constant d'un niveau de gouttes à l'autre et d'une paire de fréquences à une autre, ce n'est pas tout à fait le cas de  $n$  et  $\nu_0$ . Les valeurs de  $\nu_0$  sont différentes selon le niveau de gouttes des bandes imprimées : les  $\nu_0$  les plus faibles sont obtenus au niveau de gouttes 5, tandis que les  $\nu_0$  les plus élevés sont obtenus au niveau de gouttes 1. L'ordre  $n$  suit la même évolution. L'élaboration d'un unique modèle, indépendant du paramètre « taille de la goutte » ne paraît donc pas envisageable : les variations de  $n$  et  $\nu_0$  sont trop importantes pour être moyennées.

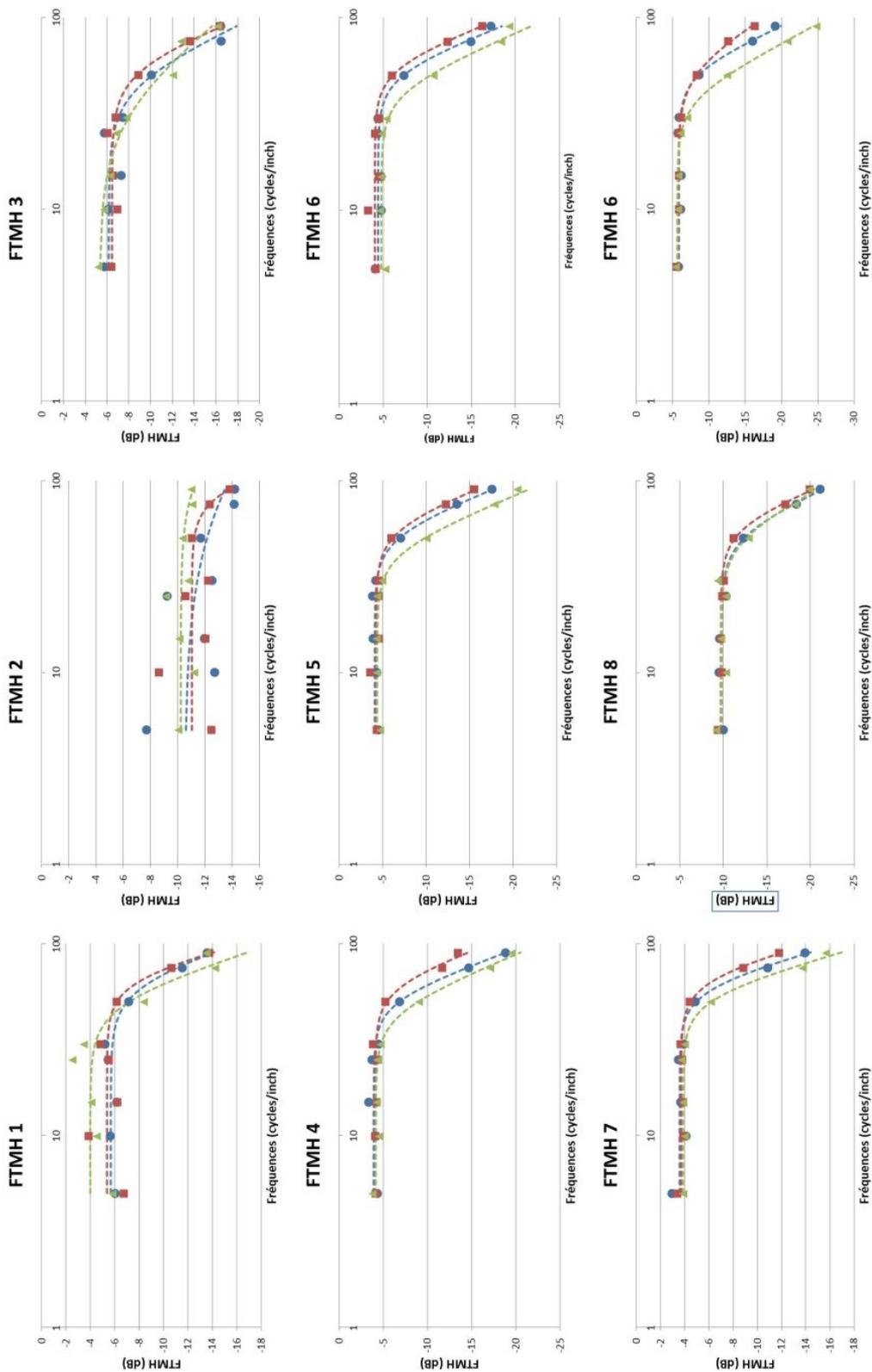


Figure B.2 12 – Diagrammes de Bode des FTMH de l'imprimante. Les fréquences sont données en abscisses en cycles / pouce et on a tracé  $20 \times \log(FTMH(\nu))$  en ordonnées. Les points signalent les valeurs de FTMH mesurées, et les lignes tracées en pointillées sont les modèles déduits. En rouge, niveau de gouttes 1, en bleu, 3, et en vert, 5.

La Figure B.2 12 donne les diagrammes de Bode obtenus pour les différents couples de hauteurs implémentés. Pour chaque diagramme, on identifie une fréquence de coupure à 3 dB. Cette fréquence est systématiquement supérieure au niveau de gouttes 1 : entre 65 et 75 cycles / pouce, selon les couples de hauteurs considérés. Dès que le plateau des FTMH s'affaisse, les performances chutent. Cet affaissement se produit systématiquement plus vite pour les imprimés au niveau de goutte 5 : cela est particulièrement net par exemple pour le couple de hauteurs n°6.

Nous avons modélisé les FTMH dans le cas où la taille de gouttes est fixée à 1. Il s'agit du paramètre le plus pertinent pour les hauteurs : celui pour lequel les performances en relief sont les meilleures. On peut écrire :

$$HMTF(w) = \frac{0.52}{\sqrt{1 + \left(\frac{v}{58.34}\right)^{5.26}}} \quad (E2.25)$$

Cette fonction est obtenue en moyennant les paramètres  $H_0$ ,  $v_0$  et  $n$ . Une optimisation est ré-effectuée pour s'assurer que le coefficient de Pearson reste satisfaisant.

### 3.4 Transition

Finalement, la taille de gouttes est un paramètre à prendre en compte si l'on imprime des structures à haute fréquence spatiale. A basse fréquence, quelle que soit la taille de goutte utilisée, l'écart en hauteurs sera respecté ; en revanche, l'aspect des profils ne sera pas le même. Au niveau de goutte minimal, les profils ressemblent bien plus à l'entrée demandée qu'aux autres niveaux de gouttes. Plus la goutte est grosse, plus le profil est déformé, et à haute fréquence, plus les performances chutent vite. Pour les basses fréquences spatiales, si les contraintes au niveau de la forme des surfaces imprimées ne sont pas trop fortes, l'utilisation des gouttes larges (niveau 5) reste pertinente : les hauteurs sont atteintes, l'impression est rapide et la dispersion de gouttelettes dans l'air ne se produit pas.

## 4. Compensation

Après avoir calculé un certain nombre de fonctions de transfert, obtenues pour différents couples de hauteurs et aux trois niveaux de gouttes, nous pouvons mettre en place un algorithme de déconvolution afin de compenser certains défauts observés. On applique l'équation (E2.19) aux différents couples de hauteurs, dans le cas du niveau de gouttes 1. Le ratio signal sur bruit est fixé à 1 dans un premier temps. De nouveaux patches sont imprimés et analysés en microtopographie. Les nouvelles fonctions de transfert sont ensuite calculées et leurs graphes sont donnés Figure B.2 13.

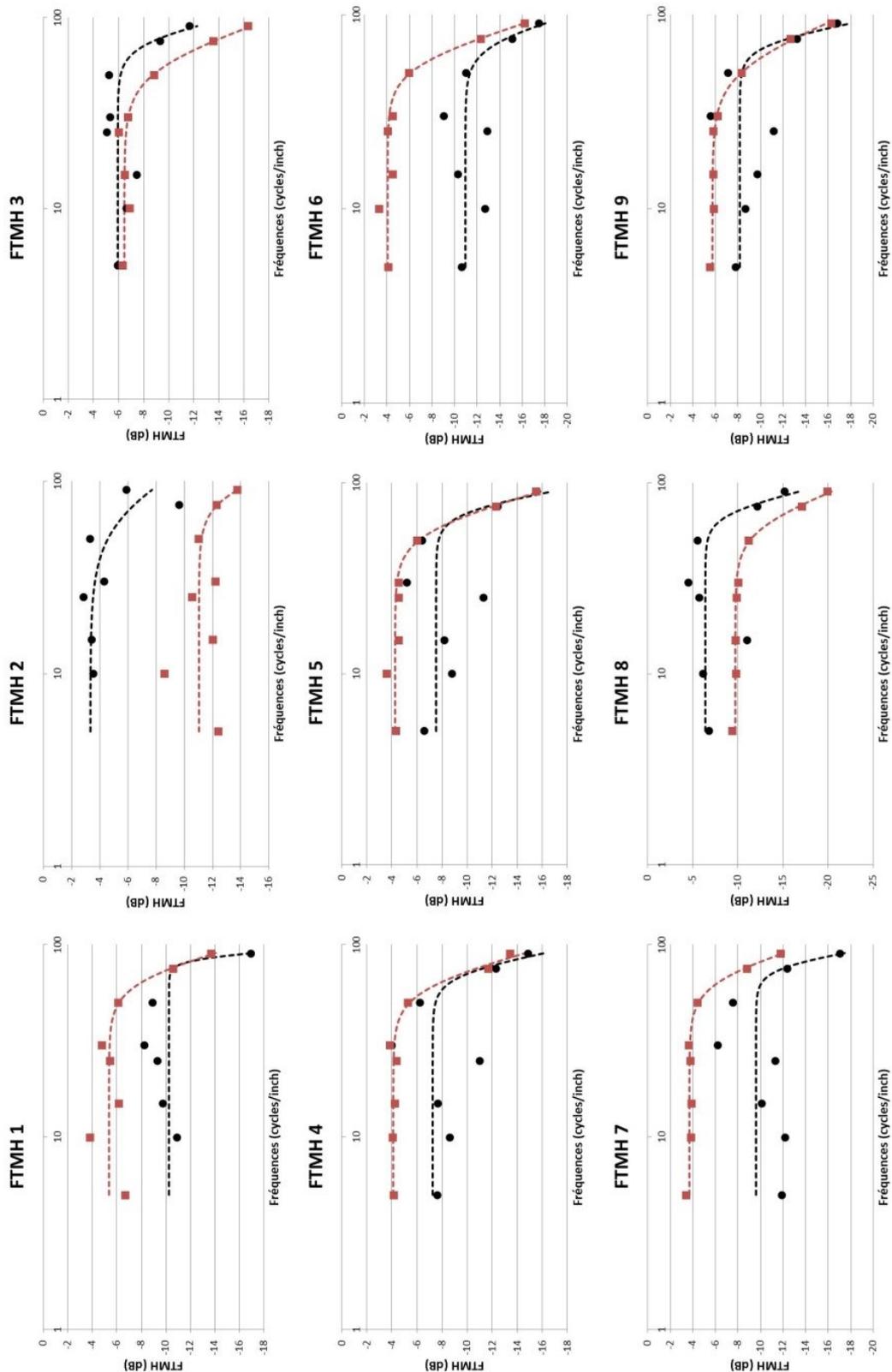


Figure B.2 13 – Diagrammes de Bode des FTMH de l'imprimante. Les fréquences sont données en abscisses en cycles / pouce et on a tracé  $20 \times \log(FTMH(v))$  en ordonnées. Les points signalent les valeurs de FTMH mesurées, et les lignes tracées en pointillées sont les modèles déduits. En rouge, FTMH au niveau de gouttes 1 ; en noir, FTMH compensées.

La Figure B.2 13 permet la comparaison entre les FTMH avant (en rouge) et après déconvolution (en noir). On voit que pour tous les couples de hauteurs, les fréquences de coupure sont améliorées par la présence du filtre : les courbes noires présentent un palier plus long, avant de chuter. L'exemple des hauteurs n°3 ou n°8 montre aussi que l'application du filtre a augmenté les valeurs des FTMH : elles sont plus proches de 1 pour plus de fréquences, ce qui indique que le signal de sortie de l'imprimante est plus proche de l'entrée demandée. Ce n'est pas le cas pour tous les couples de hauteurs considérés.

On voit que les résultats sont inégaux en fonction des couples de hauteurs. Pour certains d'entre eux, les résultats sont nettement améliorés (cas 1, 2, 3, 8 et 9) : il s'agit des couples de hauteurs tels que l'écart  $h_{max} - h_{min}$  est faible ou au contraire important. Pour les autres, dans la zone des écarts en hauteurs intermédiaires, la déconvolution n'a rien apporté.

L'analyse des hauteurs donnée Figure B.2 14 montre que l'application de la rétroaction influe sur les hauteurs atteintes.  $h_{min}$  est plus proche des valeurs demandées,  $h_{max}$  également (surtout pour les hautes fréquences !). Par contre, l'écart  $h_{max} - h_{min}$  n'est plus atteint.

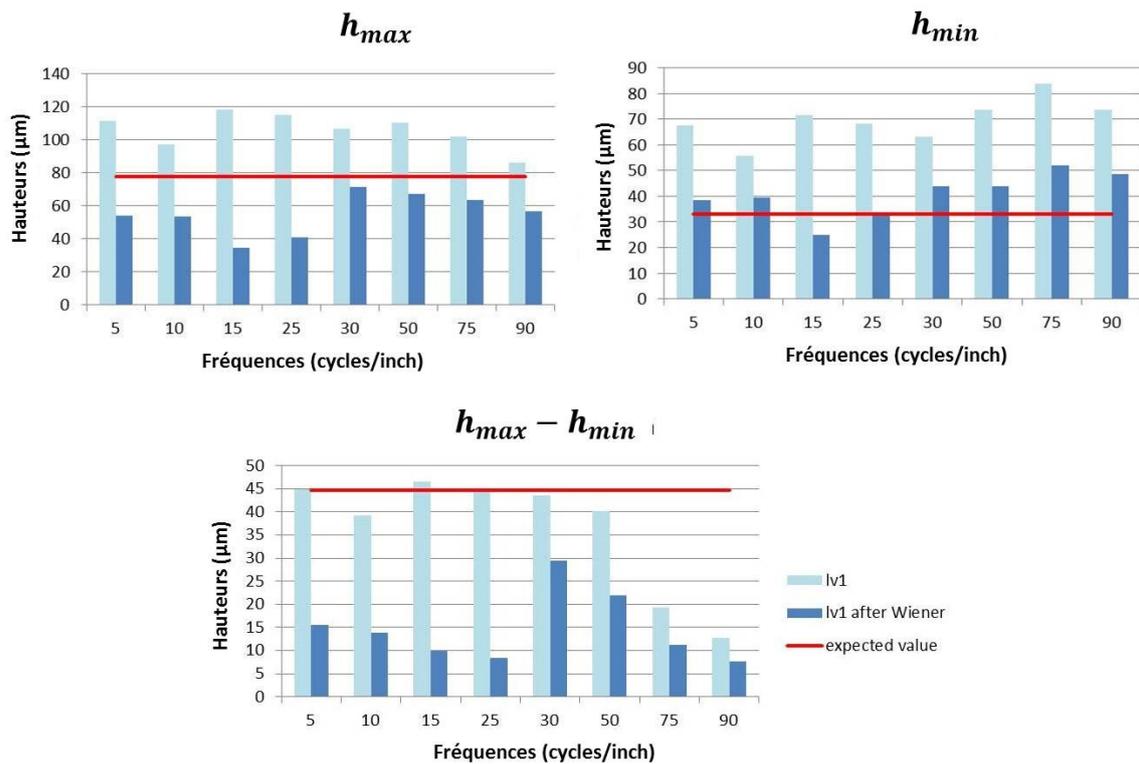


Figure B.2 14 – Hauteurs mesurées dans le cas du couple de hauteurs n°4 (tel que  $H_{max} - H_{min} = 44.7 \mu\text{m}$ ).

On voit que la compensation que nous avons implémentée donne un résultat intéressant pour certains couples de hauteurs, mais pas pour la totalité des paires. Une méthode adaptative pourrait être mise en place, afin de sélectionner à l'avance les hauteurs susceptibles de poser problème et de n'appliquer une compensation qu'à celles-ci.

## 5. Conclusion

Nous avons souhaité montrer ici que la réponse en hauteurs des imprimés pouvait être mesurée à l'aide d'un outil numérique relativement simple, adapté de l'optique, que nous avons appelé la Fonction de Transfert de Modulation en Hauteurs (FTMH). En utilisant cet outil, on peut dire que les performances en hauteurs sont les mêmes pour les trois niveaux de gouttes jusqu'à une fréquence de 50 cycles / pouce, mais que seul le plus petit niveau (la plus petite taille de goutte) donne un résultat dont l'allure géométrique est proche de ce qu'on attend. Au-delà de 50 cycles / pouce, pour les niveaux de gouttes 3 et 5, la fréquence de coupure est atteinte. Nos mesures nous ont permis d'établir une fonction numérique qui décrit le comportement de l'imprimante au niveau de gouttes 1, et d'envisager une rétroaction. L'essai de compensation que nous avons alors fait a permis d'améliorer les performances en fréquences sur certaines paires de hauteurs considérées. Si les fréquences sont améliorées, ce n'est pas le cas des hauteurs, qui ne sont plus atteintes.

Au cours de l'expérience, nous avons choisi de faire varier conjointement  $H_{max}$  et  $H_{min}$ , mais la présence de cet offset  $H_{min}$  semble interférer dans les performances de l'imprimante. Pourtant, en pratique, la présence d'un offset est un cas courant : notre protocole est ainsi plus proche d'une structure réelle. Précisons également que les résultats de cette courte étude ne sont valables que pour un jeu de paramètres fixés : encre cyan, direction d'impression x, temps d'exposition aux UV court. Il est évident que les autres encres, et en particulier les mélanges d'encre (demi-ton) produiraient d'autres résultats.

### 5.1 Limites

La première limitation à mentionner est que pour appliquer la déconvolution, nous avons fait l'hypothèse de la linéarité du système d'impression. Nous considérons que nous pouvons faire cette hypothèse car nous avons fixé les paramètres d'impression (couleur, orientation, taille de gouttes). Néanmoins, ce point peut être sujet à caution [110].

L'autre point qui pose problème est celui du calcul du ratio signal sur bruit. Nous l'avons fixé à 1 afin d'effectuer un test rapide de la méthode. Il serait judicieux de le calculer précisément, en effectuant par exemple le rapport « hauteur mesurée » sur « hauteur demandée » pour un cas simple à une couche d'encre. En le fixant à 1, nous supposons que le bruit est égal au signal, ce qui est une hypothèse pessimiste. Dans le filtrage de Wiener, plus le bruit est fort, et moins le filtre sera efficace. D'autres méthodes de déconvolution peuvent aussi être testées.

### 5.2 D'un point de vue industriel

D'un point de vue industriel, il faut noter que la méthode, telle que nous l'avons présentée ici, pose problème par la lourdeur de sa mise en place. Les paramètres sont nombreux, les sessions d'impression se répètent, et les mesures prennent beaucoup de temps. C'est pourquoi nous en avons proposé une simplification, qui a fait l'objet d'un brevet [111]. Dans ce texte, nous expliquons comment réduire le nombre de patches à imprimer et quels paramètres

calculer afin d'arriver rapidement à un graphe permettant l'évaluation des performances d'un système d'impression en relief. La méthode d'analyse des imprimés en 2.5D ou en 3D peut ainsi être répétée facilement pour évaluer la qualité de la réponse en hauteurs d'une encre ou d'un motif. En particulier, nous avons ainsi évalué la différence entre les directions d'impression (voir Annexe B.2.2).

### 5.3 Perspectives

La méthode que nous avons présentée ici pourrait donc être utilisée pour caractériser en hauteurs tous types d'imprimés, 2.5D ou 3D. Mais l'étude a aussi montré qu'à l'échelle du micromètre, l'imprimante ne peut pas produire tous les reliefs à toutes les hauteurs : problème qui peut être en partie résolu par l'implémentation d'une déconvolution adaptée. Celle que nous avons proposée ici avait pour but de tester la méthode ; d'autres techniques peuvent être essayées, qui donneraient peut-être de meilleurs résultats.

Les différents patches imprimés lors de cette étude étaient à 8 fréquences spatiales différentes (de 5 à 90 cycles / pouce). Pourtant, à l'œil, les différences en brillant n'étaient pas sensibles (Figure B.2 15). Une rapide mesure au glossmètre (Table B.2 2) a montré que les patches à la fréquence spatiale la plus élevée montraient le plus faible gloss, mais nous sommes encore loin de la zone des mats.

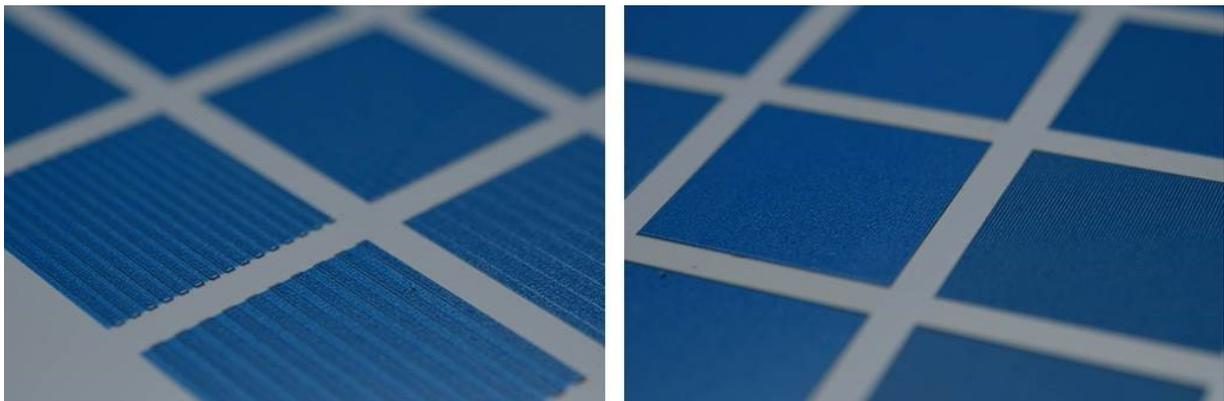


Figure B.2 15 – Aspect de patches de fréquences spatiales différentes.

La Table B.2 2 donne les valeurs de brillant spéculaire obtenues. On remarque en particulier que la valeur la plus faible (7 GU) est obtenue pour le couple de hauteurs n°7, le seul à ne pas présenter d'offset, à la fréquence spatiale 50 cycles / pouce. Au-delà de cette fréquence, dans la configuration choisie ici, le relief n'est pas assez rugueux pour créer une sensation mate.

Couple de hauteurs n°	Fréquences (cycles/pouce)							
	5	10	15	25	30	50	75	90
1	37	38	39	39	35	33	34	34
2	35	35	34	33	33	30	31	32
3	36	36	36	35	31	27	31	32
4	36	37	37	37	23	16	21	29
5	36	37	37	37	22	12	18	28
6	37	38	37	37	30	26	28	32
7	34	33	33	32	16	7	10	17
8	34	35	34	34	23	16	19	26
9	35	35	36	36	17	9	12	23

Table B.2 2 – Valeurs de brillant spéculaire à 60° en Gloss Units (GU) obtenues sur une plaquette imprimée au niveau de goutte 1.

Pour gagner en mat, nous allons donc devoir changer les structures spatiales, les lignes n'étant pas le meilleur modèle, puis gérer les couples de hauteurs (idéalement, sans offset), et augmenter les fréquences d'impression pour se rapprocher de la résolution du système. Les FTMH à plus hautes fréquences sont présentées en Annexe B.2.1. Les fréquences de coupure calculées plus haut nous indiquent que certains motifs, trop étroits, ne pourront être reproduits par l'imprimante : au-delà de 70 cycles / pouce, les performances chutent au niveau de goutte 1. Cette fréquence correspond à un motif de 3.2 pixels : on sait donc que l'imprimante ne reproduira pas de manière satisfaisante un motif plus petit.



## Chapitre B.3. Brillant des imprimés

Nous avons vu dans les parties précédentes qu'il était impossible de diminuer nettement les niveaux de brillant en jouant uniquement sur les paramètres de l'imprimante, ou en n'implémentant que des structures à une dimension telles des lignes. Nous savons également que la résolution de l'imprimante étant de 450 pixels / pouce, nous devons nous contenter de structures d'au moins 56  $\mu\text{m}$  de largeur (1 pixel). Nous ne pourrions donc jamais reproduire des reliefs de l'ordre du micron ni même de la dizaine de microns, ce qui est pourtant l'ordre de grandeur des structures mates réelles. De plus, l'étude en fréquences du chapitre précédent nous indique que les structures de moins de 3 pixels ne seront pas bien construites : les performances en relief de l'imprimante chutent à partir de la fréquence 70 cycles / inch. Il nous faut donc composer, avec la résolution et la fréquence de coupure comme facteurs limitants, pour créer des structures plus complexes : des motifs en trois dimensions qui produiront une sensation de brillant proche de celle d'une surface réelle.

Nous reviendrons dans une première partie sur la stratégie employée par Saint-Gobain [32, 33] pour créer des surfaces mates en verre, puis nous présenterons les structures que nous avons créées en nous inspirant de leurs travaux. L'influence des différents paramètres d'impression sera étudiée, et la rugosité réelle mesurée. Les résultats consistent à la fois en abaques qui permettent, en modulant un unique paramètre, d'imprimer des surfaces très mates, et en courbes qui illustrent la relation entre les niveaux de brillant en Gloss Units (GU) et la rugosité des surfaces, en micromètres. La BRDF des surfaces d'intérêt sera donnée pour indication. Une expérience psycho-visuelle conclut ce chapitre.

# 1. Structures mates

L'objectif de cette partie est de développer une stratégie du mat applicable sur un système d'impression en relief, pour contrer l'effet plastique des encres et produire un objet au rendu satisfaisant. Pour cela, nous avons vu que la seule solution envisageable, sans modifier la composition des encres ni ajouter de vernis matant, était de créer directement de la rugosité grâce au procédé d'impression en relief.

## 1.1 Etat de l'art

Saint-Gobain, à travers les publications [32] et [33], a présenté la nano-impression lithographique comme un procédé technique permettant de créer des surfaces rugueuses mates. En créant de petits piliers à l'intérieur de la structure du verre, la diffusion de la lumière est modifiée et le rendu final de l'objet est mat. En modifiant le taux de remplissage de l'espace en piliers, les auteurs modifient le brillant perçu : plus la couverture en piliers est dense, et plus le verre est mat. On voit Figure B.3 1 que l'arrangement des piliers n'est pas choisi au hasard : il est périodique et régulier selon les directions X et Y du plan.

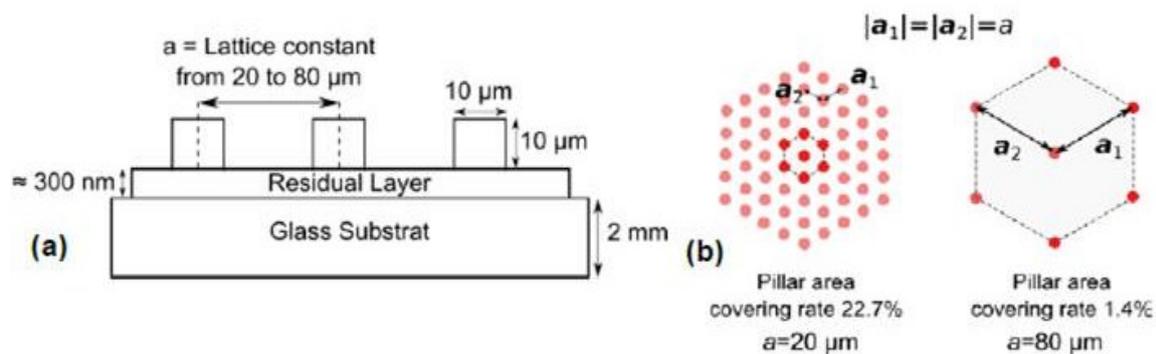


Figure B.3 1 – Piliers décrits par [33]. L'arrangement des piliers de verre est de type hexagonal, selon un maillage plus ou moins serré selon le taux de couverture de la surface.

Nous allons nous inspirer de cette méthode pour créer des surfaces au rendu mat. Le matériau employé dans notre cas est l'encre. A la différence de la nano-impression lithographique employée par Saint-Gobain, qui crée des piliers d'allure très nette, nous devons composer avec un système d'impression, non linéaire, qui va créer des piliers de forme moins bien contrôlée.

## 1.2 Configurations

### 1.2.1 Premières restrictions

Après plusieurs essais, on constate rapidement que l'unique moyen de faire du mat est de créer des structures très proches de la résolution de l'imprimante, **450 pixels / pouce** : à plus grande échelle, la sensation mate ne sera pas obtenue. Nous allons donc implémenter des structures à piliers de l'ordre du pixel. Cela élimine donc immédiatement les structures

complexes comme les cônes, qui doivent être implémentés sur un nombre de pixels bien plus grand qu'un pilier simple. De plus, nous savons par l'étude en fréquences que les motifs trop étroits, construits sur un ou deux pixels, ne seront pas convenablement créés : les performances en hauteur de l'imprimante chutent à partir d'une certaine fréquence, ce qui rend impossible la création de motifs très fins. Au niveau de gouttes 1, la limite est fixée à 3 pixels : si les motifs sont plus petits, ils risquent d'être mal construits. D'un autre côté, l'acuité visuelle nous empêche de créer des motifs trop larges : l'œil perçoit les détails de plus de 148  $\mu\text{m}$  à 50 cm de distance, ce qui correspond dans notre cas à 2.6 pixels. Ainsi, si nos structures font plus de 2.6 pixels, elles seront discernables à l'œil, mais si elles font moins que 3 pixels, elles seront difficilement implémentables en hauteur. Nous avons donc créé des motifs de 1, 2, 3 ou 4 pixels, présentés Figure B.3 2. Dans un premier temps, nous envisageons simplement des **structures périodiques**.

### 1.2.2 Description des configurations retenues

Nous proposons donc 12 configurations, présentées Figure B.3 2. Le motif de base est constitué d'un pixel, qui représente une surface de 56  $\mu\text{m}$  de côté. Divers arrangements sont proposés, où les fréquences spatiales et les tailles de piliers varient.

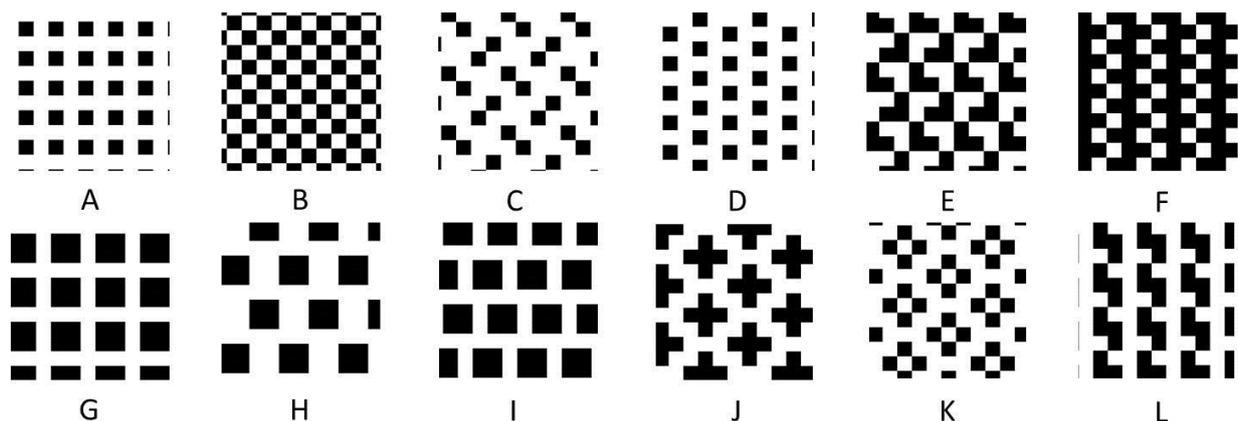
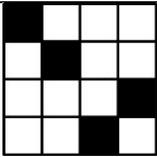
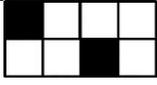
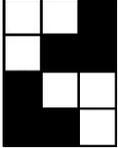
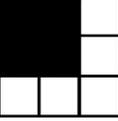
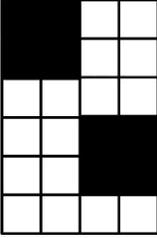
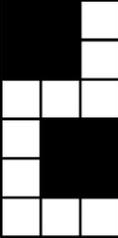
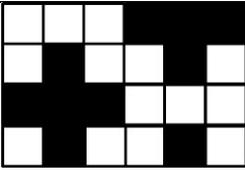


Figure B.3 2 – Motifs implémentés. Chaque carré noir correspond à un pixel, c'est-à-dire à un pilier idéal de 56  $\mu\text{m}$  de côté. Les motifs forment donc soit des piliers de 56  $\mu\text{m}$  de côté, soit des piliers de 112  $\mu\text{m}$  de côté (2 par 2 pixels), soit des formes hybrides (carrés incomplets ou décalés, croix).

D'après ce qui précède, nous savons que l'imprimante peinera à créer les motifs A, B, C ou D à des hauteurs élevées ; mais pourtant ce sont ces motifs qui devraient limiter la sensation de texture visuelle. On notera la régularité de certains arrangements (A, B, G) tandis que d'autres sont volontairement décalés, pour briser la symétrie et donc la potentielle texture visuelle.

Chaque configuration peut être décrite comme un arrangement périodique par trois paramètres de maille : deux longueurs  $a$  et  $b$  (dans les dimensions X et Y respectivement), et un angle  $\gamma$  qui vaudra ici toujours  $90^\circ$  (système périodique à deux dimensions). La Table B.3 1 donne les paramètres de maille utilisés.

Configuration	$a$	$b$	Taux de couverture	Motif
A	2	2	25 %	
B	2	2	50 %	
C	4	4	25 %	
D	2	4	25 %	
E	4	3	50 %	
F	2	3	66 %	
G	3	3	44 %	
H	6	4	33 %	
I	6	3	44 %	
J	4	6	42 %	

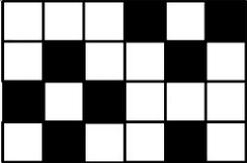
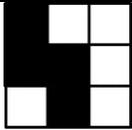
K	4	6	33 %	
L	3	3	44 %	

Table B.3 1 – Paramètres de mailles, taux de couverture de la surface et motif de chacune des 12 configurations implémentées.

### 1.2.3 Protocole expérimental

Nous nous plaçons dans les conditions d'expériences optimales décrites dans le chapitre B.1 : encre cyan, temps d'exposition aux UV court. La taille de gouttes reste notre unique variable. Les piliers seront imprimés sur une sous-couche constante plane, blanche, en taille de goutte 5. Nous choisissons d'imprimer chaque configuration à plusieurs hauteurs : ces variations de la hauteur des piliers nous permettront peut-être de contrôler la rugosité de la surface. La relation entre hauteur des piliers et brillant fait l'objet de la suite de ce chapitre. Les hauteurs choisies sont : 10, 25, 50, 65, 80 et 100  $\mu\text{m}$ .

### 1.2.4 Mesure du brillant spéculaire

Nous choisissons d'évaluer le brillant spéculaire au glossmètre, comme nous l'avons précisé au chapitre A.2. Nous répéterons systématiquement 5 fois la mesure afin d'obtenir un résultat moyenné fiable. Nous ne donnons les résultats qu'à l'angle de mesure 60°. La norme ISO 2813 préconise l'usage de l'angle 85° pour les surfaces mates, mais nous lui préférons 60°, à la fois plus représentatif de la manipulation d'un objet, et sans doute plus pertinent dans le cas de surfaces très rugueuses. Le glossmètre utilisé, le KSJ™ 268-F2, a une zone de mesure de 9 x 16 mm<sup>2</sup>. En conséquence, des zones imprimées d'1 pouce de côté, soit 2.54 cm<sup>2</sup>, suffisent.

Pour prendre en compte les variations de brillant dues à la structure à piliers implémentée, nous répétons les mesures dans 4 directions : les directions 1, 3, 5 et 7 de la Figure B.3 3. Nous ferons également des tests dans les directions diagonales (2, 4, 6 et 8).

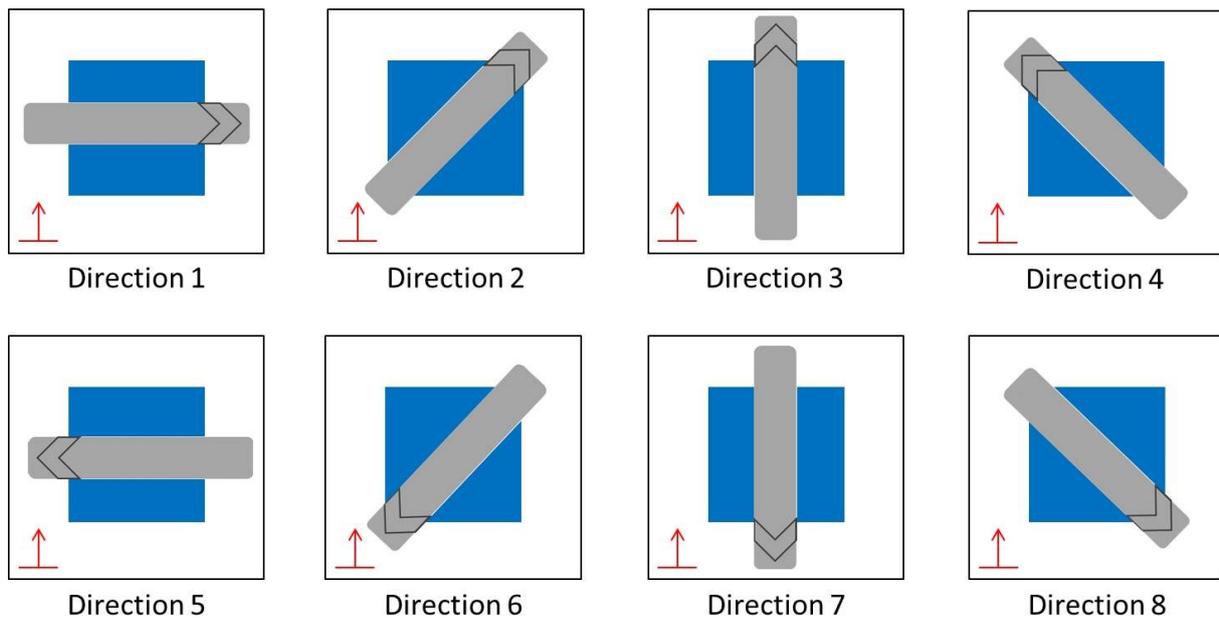


Figure B.3 3 – Directions de mesure. La flèche rouge signale la direction d'impression des patches.

### 1.3 Influence de la hauteur des piliers sur le brillant

Chaque configuration est donc imprimée, au niveau de goutte 1, à 10  $\mu\text{m}$ , 25  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 65  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$  et 100  $\mu\text{m}$  de hauteur. Les résultats sont présentés Figure B.3 4 : on voit nettement que le niveau de brillant spéculaire diminue lorsque la hauteur des piliers augmente. Nous nous attendions à ce résultat : en augmentant la hauteur des piliers, on augmente la rugosité, ce qui a pour conséquence de faire baisser le brillant spéculaire.

On constate de plus que les configurations implémentées n'ont pas toutes le même comportement : si l'on regarde la Figure B.3 4, on voit qu'à faible hauteur de piliers, les configurations donnent des niveaux de brillant assez similaires (espacés d'1 GU environ), tandis qu'à hauteur de piliers élevée, les écarts entre les configurations se creusent. A 65 ou 80  $\mu\text{m}$ , on note 3 GU d'écart entre la configuration B et la configuration D, respectivement la plus mate et la plus brillante. Toutes les configurations ne donnent donc pas le même résultat. De plus, on constate que certaines configurations ont un comportement qui semble linéaire, tandis que d'autres sont plus chaotiques. La configuration I par exemple, signalée par les triangles bleus Figure B.3 4, paraît linéaire. Ce constat nous permet de sélectionner certaines configurations, robustes et modélisables : E, G et I (Figure B.3 5).

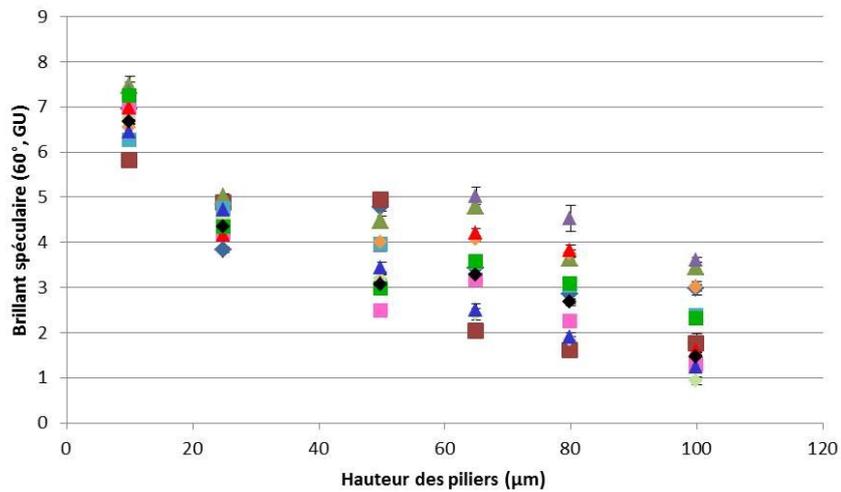


Figure B.3 4 – Brillant spéculaire à 60° des imprimés en fonction de la hauteur des piliers demandée, pour les 12 configurations implémentées.

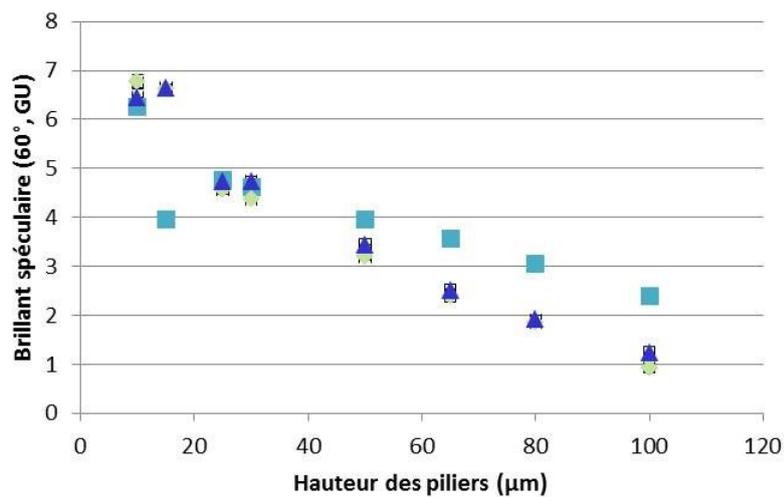


Figure B.3 5 – Brillant spéculaire à 60° des imprimés en fonction de la hauteur de piliers demandée, pour les trois configurations E, G et I. Deux points supplémentaires à 15 et 30 μm ont été ajoutés.

Les trois courbes qui décrivent le brillant spéculaire à 60°, tracées Figure B.3 5, peuvent être modélisées simplement en fonction de la hauteur des piliers implantée. On obtient :

Configuration	Modèle	Coefficient de Pearson
E	$gloss(60^\circ) = -1.2621 \times \ln(h) + 8.5953$	87.7 %
G	$gloss(60^\circ) = -2.5835 \times \ln(h) + 13.1070$	99.1 %
I	$gloss(60^\circ) = -2.4189 \times \ln(h) + 12.6431$	98.3 %

Table B.3 2 – Modèles empiriques issus des courbes expérimentales qui décrivent l’allure du brillant spéculaire à 60° en fonction de la hauteur  $h$  des piliers implantés.

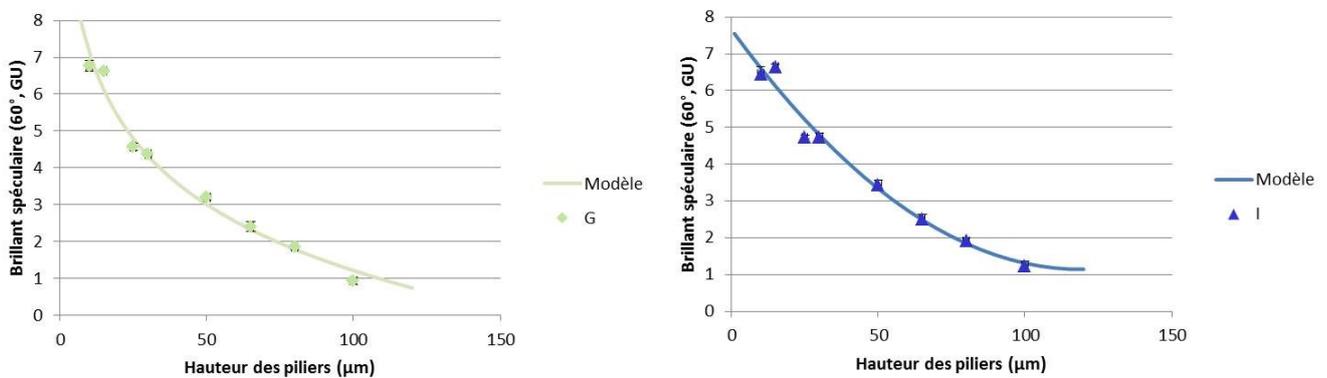


Figure B.3 6 – Points expérimentaux et modèle pour les deux configurations G (en vert) et I (en bleu). Ces courbes peuvent être utilisées comme des abaques : pour une valeur de brillant désirée, la courbe donne la hauteur des piliers à implémenter.

Ces trois configurations E, G et I (G et I étant tracées Figure B.3 6) apparaissent donc particulièrement intéressantes pour « faire du mat » avec un système d’impression en relief comme l’impression 2.5D.

## 1.4 Influence des paramètres d’impression sur le brillant

### 1.4.1 Taille de gouttes

Les piliers des configurations E, G et I ont été imprimés aux trois tailles de goutte 1, 3 et 5 (respectivement données à 1.76, 5.28 et 8.8 µm de hauteur). La Figure B.3 7 donne les résultats obtenus pour la configuration E (la tendance est similaire pour G et I). On voit que lorsque les piliers sont imprimés au niveau de goutte 5, le brillant stagne et n’atteint pas les valeurs les plus mates. Au niveau de goutte 3, le brillant décroît bien avec la hauteur des piliers, mais c’est avec les plus petites gouttes que les niveaux de brillant les plus faibles sont atteints. Le même constat est fait avec les configurations G et I : plus les gouttes sont grosses, plus elles s’étalent, plus les piliers sont affaissés et donc moins la surface est mate. Pour que la rugosité soit satisfaisante (suffisamment en tous cas pour que le brillant spéculaire

diminue), les tailles de gouttes les plus faibles (lv 1) doivent être utilisées. Notons tout de même que selon le niveau de brillant désiré, la taille de goutte 3 peut être suffisante.

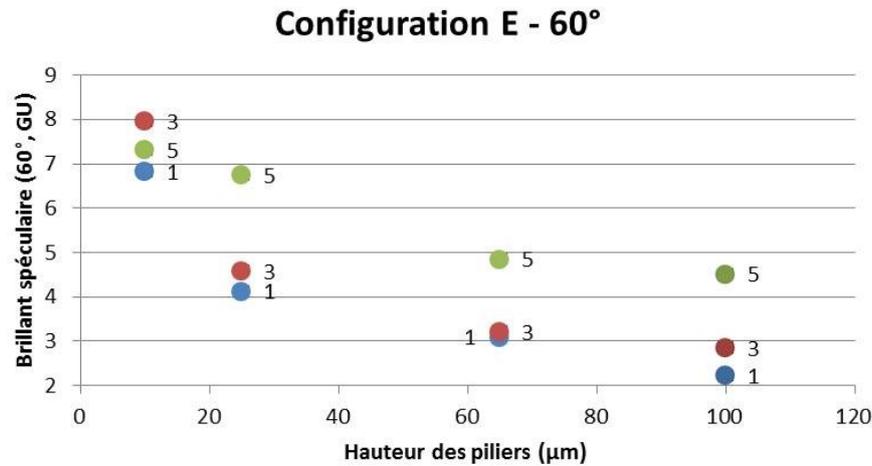


Figure B.3 7 – Brillant spéculaire à 60° des imprimés en fonction de la hauteur de piliers demandée, pour la configuration E, aux trois niveaux de gouttes 1, 3 et 5.

#### 1.4.2 Temps d'exposition aux UV

Les piliers aux configurations E, G et I sont imprimés aux trois temps d'exposition aux UV : minimal, intermédiaire et maximal. Pour les trois configurations, aucune tendance ne se dessine Figure B.3 8 : les variations extrêmement faibles ne peuvent être considérées autrement que comme des conséquences de la variabilité du glossmètre. Aucun temps d'exposition ne pouvant être privilégié, nous continuerons donc à travailler au temps minimal.

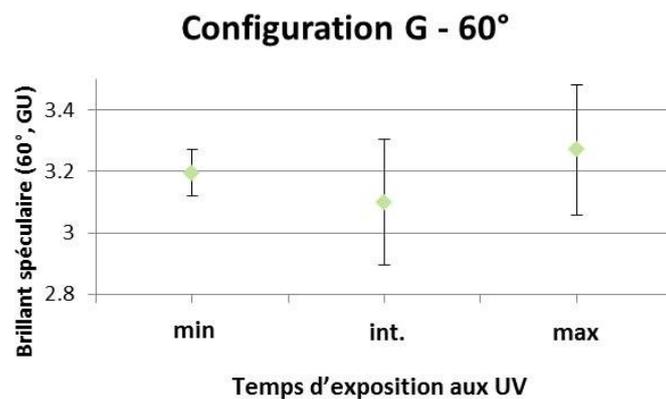


Figure B.3 8 – Brillant spéculaire à 60° des imprimés en fonction du temps d'exposition aux UV, pour la configuration G, pour des piliers de hauteur demandée 80 µm.

### 1.5 Transition

On voit donc assez facilement qu'en contrôlant un unique paramètre – la hauteur des piliers – on peut imprimer des surfaces mates. Tout l'intérêt de la méthode repose dans le contrôle facile du niveau de brillant à imprimer : si on désire imprimer une surface très mate, de

brillant  $g_t = 2 GU$ , l'abaque de la Figure B.3 6 nous dit qu'il faut implémenter des piliers de hauteur  $70 \mu\text{m}$  avec la configuration G. Notons que les trois configurations satisfaisantes (parce qu'au comportement modélisable) sont trois motifs épais, aux piliers larges. Nous voyons pourquoi dans la partie suivante.

## 2. Etude en rugosité

Pour compléter les mesures au glossmètre, nous avons effectué une série de mesures de rugosité avec la station de microtopographie. Jusqu'à présent, les courbes que nous avons présentées montraient l'évolution du brillant spéculaire à  $60^\circ$  en fonction de la hauteur théorique des piliers, c'est-à-dire la hauteur choisie par l'utilisateur et incluse dans le protocole d'impression. Néanmoins, la hauteur réelle est forcément différente, à cause des divers phénomènes physiques qui interviennent lors de l'impression 2.5D. Nous allons ici tracer l'évolution du brillant en fonction de la rugosité, qui est une caractéristique réelle des surfaces imprimées. Nous passerons ainsi d'un système théorique – abaques qui donnent le brillant spéculaire pour une certaine action de l'utilisateur, à savoir la gestion de la hauteur des piliers – à un système réel – abaques qui donnent le brillant spéculaire pour une rugosité mesurée.

### 2.1 Topographies réelles

#### 2.1.1 Protocole

Pour que le résultat de nos mesures soit représentatif de toute la surface imprimée, tout en limitant les temps d'acquisition, nous choisissons de scanner trois petites surfaces sur chacun des patches imprimés. Nous faisons ainsi l'hypothèse que les surfaces imprimées sont homogènes ; hypothèse avérée : dans la majeure partie des cas, les valeurs de rugosité obtenues pour chacun des trois scans effectués sont similaires. Les paramètres des scans sont donnés Table B.3 3.

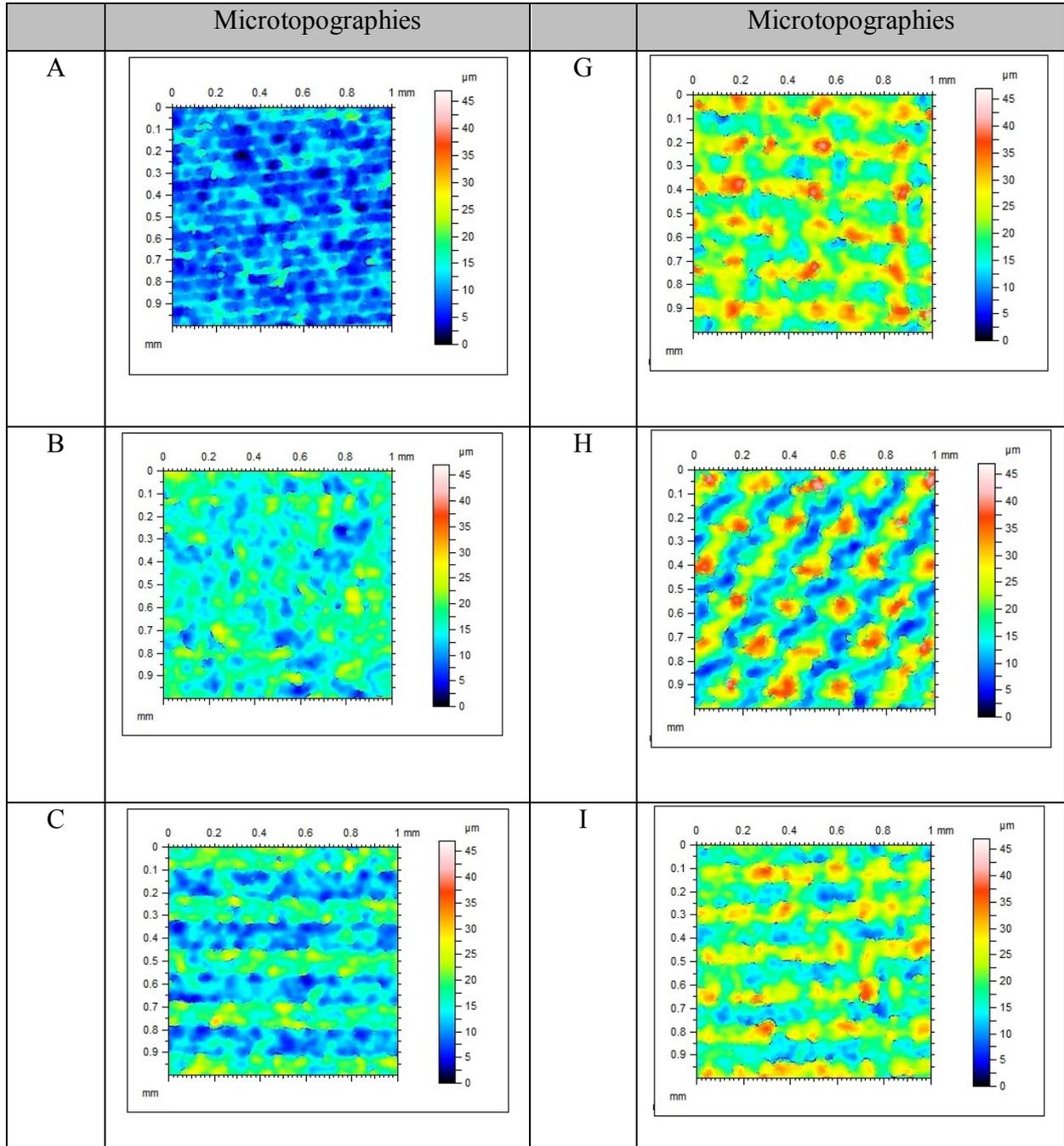
Sonde de mesure	$600 \mu\text{m}$
Pas de mesure en X et en Y	$1 \mu\text{m}$
Distance en X et en Y	$1 \text{ mm}$
Vitesse du capteur en X	$500 \mu\text{m} / \text{s}$
Fréquence d'échantillonnage	$1000 \text{ Hz}$
Temps d'acquisition	$1 \text{ h } 30 \text{ min}$

Table B.3 3 – Paramètres d'acquisition des surfaces rugueuses utilisés sur la station de microtopographie.

Différentes valeurs de rugosité sont extraites de chacune des zones mesurées, et moyennées sur les trois zones. On espère ainsi s'affranchir des éventuels problèmes dus à la mesure (points non mesurés, poussières) ainsi que des variabilités internes au processus d'impression.

### 2.1.2 Cartographies

Plusieurs exemples de microtopographies sont donnés Table B.3 4, pour les 12 configurations imprimées à la hauteur 50  $\mu\text{m}$ . On distingue nettement les piliers, dont la largeur varie selon les configurations.



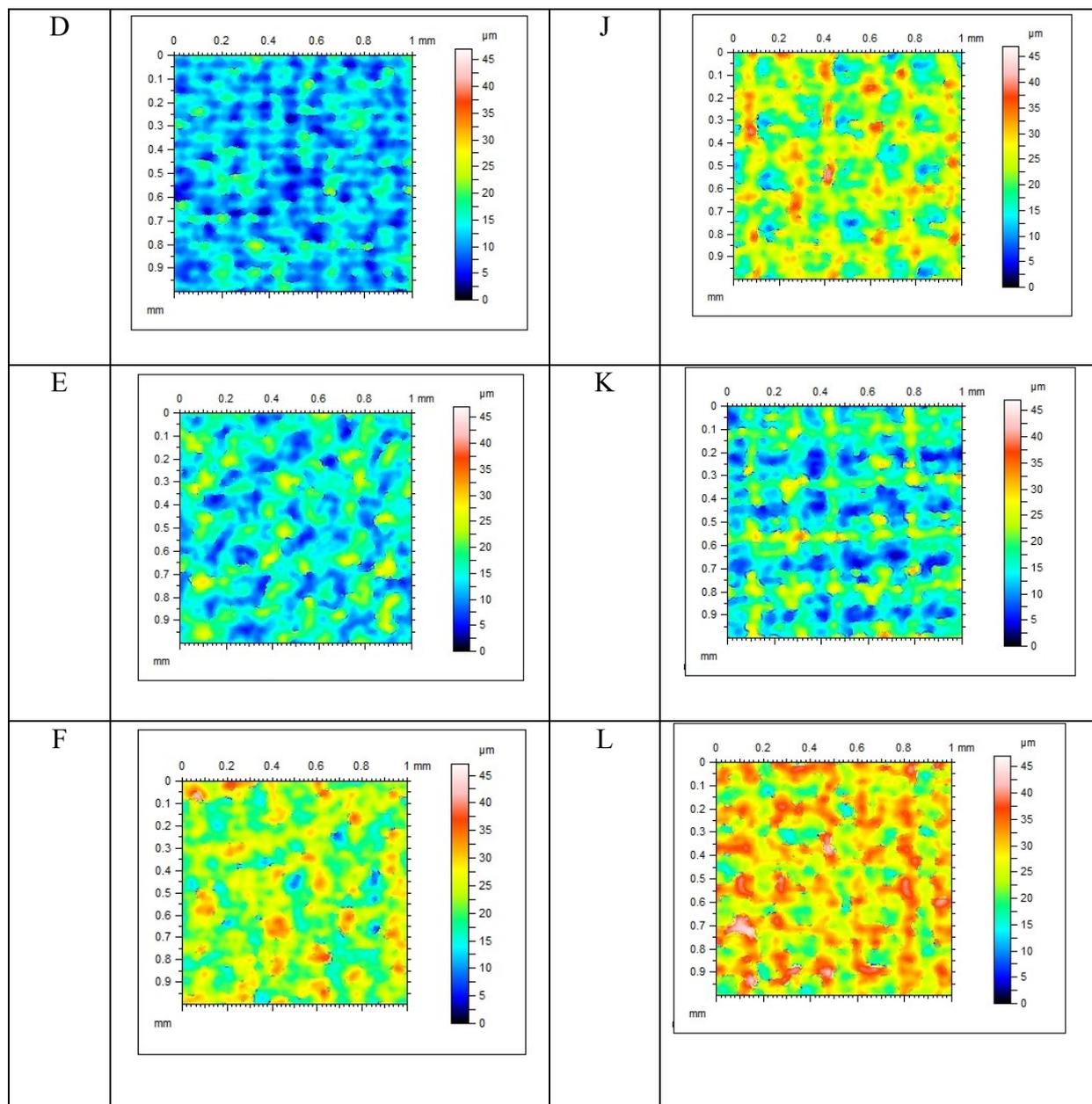


Table B.3 4 – Microtopographies choisies des configurations A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K et L imprimées à la hauteur 50  $\mu\text{m}$ . L'échelle est la même pour toutes les configurations (47  $\mu\text{m}$  au maximum).

Les arrangements périodiques sont nettement visibles sur les cartographies de la Table B.3 4. Certaines configurations apparaissent très régulières (c'est le cas de H, qui alterne vallées et piliers), tandis que d'autres sont plus confuses (B ou F par exemple). Toutes les cartographies ont été mises à la même hauteur, ce qui permet de voir si toutes les configurations atteignent les hauteurs demandées ou pas. A et D par exemple n'atteignent que des hauteurs très faibles : leurs piliers sont trop étroits pour être construits. Il apparaît que seules les configurations F, G, H, I, J et L ont des piliers suffisamment larges pour atteindre la hauteur maximale implémentée. On note que parmi ces 6 configurations, seule H présente une alternance régulière de piliers et de vallées. Les autres configurations ont des vallées et des pics moins marqués ; leur rugosité sera moins élevée.

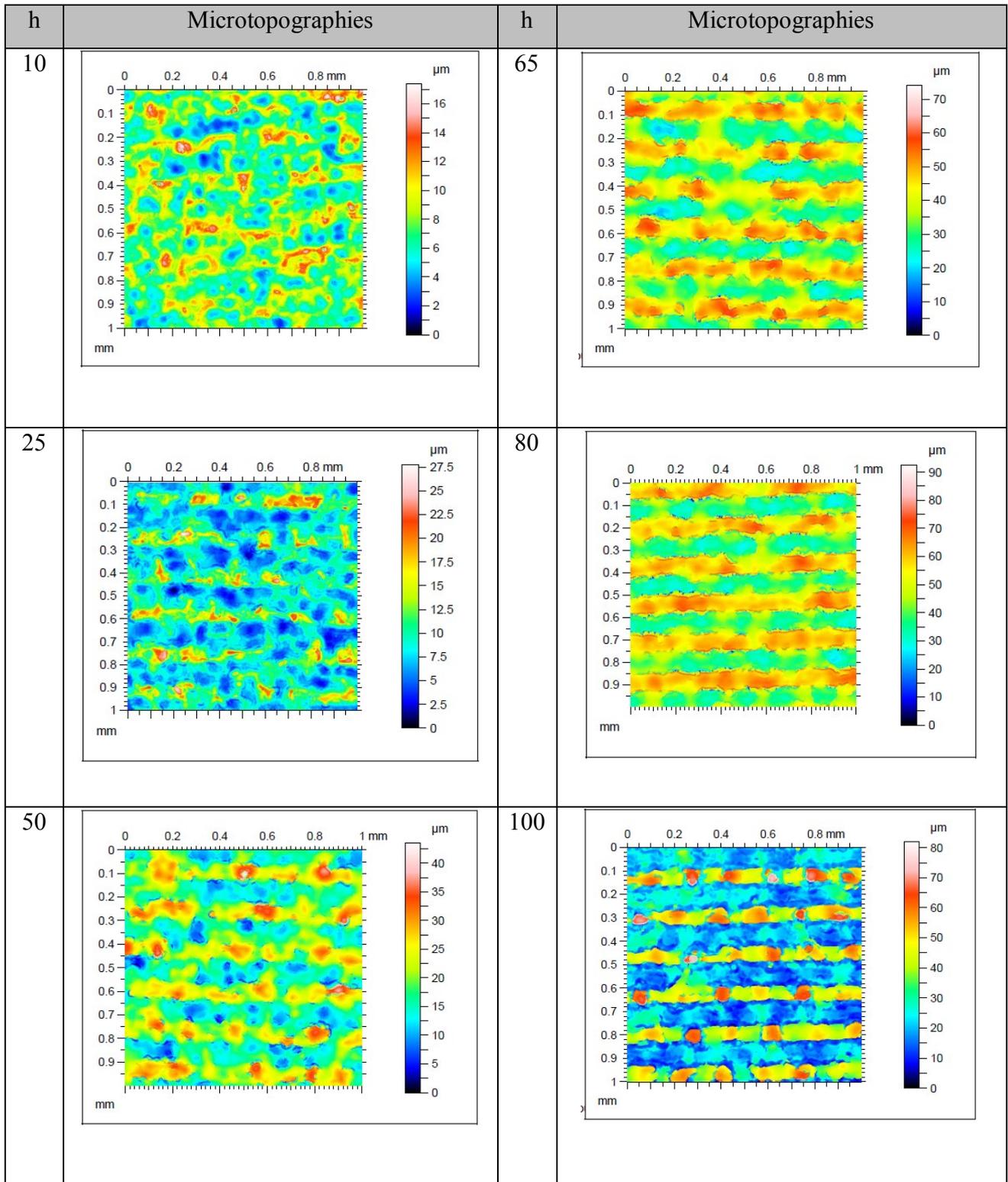


Table B.3 5 – Microtopographies choisies, pour la seule configuration I, imprimée aux hauteurs 10, 25, 50, 65, 80 et 100  $\mu\text{m}$ . Attention, l'échelle couleur change selon les configurations.

La Table B.3 5 présente la seule configuration I à 6 hauteurs différentes. Les piliers, très peu marqués aux faibles hauteurs (10, 25  $\mu\text{m}$ ), deviennent de plus en plus larges à mesure que la

hauteur de l'imprimé augmente et que les couches d'encre ont le temps de se superposer les unes aux autres.

## 2.2 Paramètres de rugosité

A partir des cartographies acquises, les paramètres de rugosité sont extraits et moyennés. Nous choisissons de tracer certains d'entre eux en fonction du brillant spéculaire à 60°.

### 2.2.1 Hauteur maximale

Idéalement, la hauteur maximale  $S_z$  devrait être égale à la hauteur  $h$  des piliers choisie par l'opérateur au moment de l'impression. Mais les défauts liés à l'impression (viscosité de l'encre, temps de séchage, passage du chariot, vitesse d'éjection des gouttes...) ainsi que les configurations de piliers ne rendent pas cette égalité automatique. On voit Figure B.3 9 et Figure B.3 10 que selon les configurations, la hauteur maximale atteinte est plus ou moins éloignée de la hauteur implémentée.

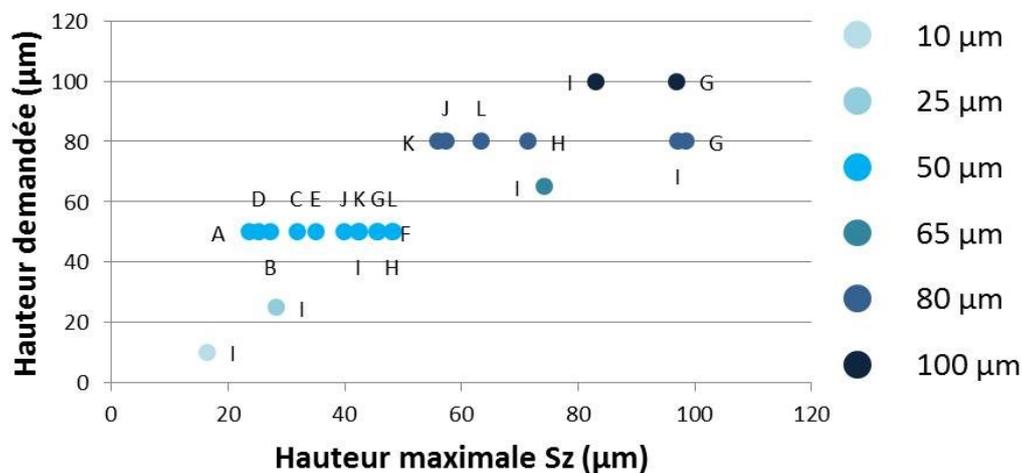


Figure B.3 9 – Hauteur maximale  $S_z$  tracée en fonction de la hauteur  $h$  demandée.

On note Figure B.3 9 des écarts importants selon les configurations. A la hauteur demandée  $h = 50 \mu m$ , seules les configurations à larges piliers, F, G, I, K, L ont une hauteur maximale atteinte  $S_z$  proche de  $50 \mu m$ . Les autres configurations, à petits piliers, n'atteignent pas la hauteur demandée. A la hauteur demandée  $h = 80 \mu m$ , les configurations G et I dépassent la hauteur demandée : les piliers sont suffisamment bien construits pour que certains d'entre eux dépassent la hauteur  $h$ , à cause des défauts d'impression. La configuration G paraît même plus robuste que I (hauteur maximale  $100 \mu m$  mieux atteinte).

Logiquement, plus la hauteur maximale atteinte est élevée, et plus le niveau de brillant spéculaire est bas. Pour le vérifier, nous regardons pour la seule hauteur demandée  $h = 50 \mu m$  le brillant spéculaire en fonction de la hauteur maximale  $S_z$  (Figure B.3 10). Deux groupes se dessinent : A, B, C, D et E d'un côté, F, G, H, I, J, K, L de l'autre. Pour le premier groupe, la hauteur de  $50 \mu m$  n'est pas atteinte ;  $S_z$  vaut entre  $22$  et  $32 \mu m$ . Dans le second groupe, la hauteur maximale est plus élevée. Le second groupe rassemble des configurations

aux piliers larges. De manière assez logique, plus les piliers sont larges, plus ils ont une chance de tenir à l'impression. En effet, construire un pilier très étroit avec de très petites gouttes nous expose au risque que les gouttes tombent à côté. On note que K et J ont un comportement similaire : les piliers troués de K équivalent aux piliers pleins de J, par suite des défauts liés au processus d'impression.

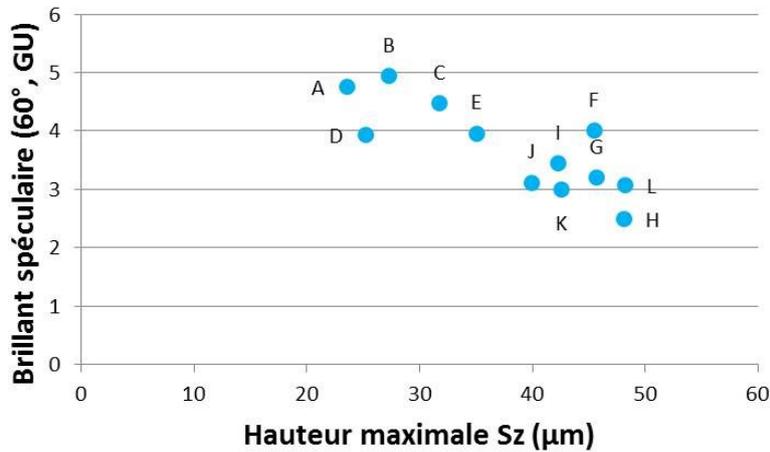


Figure B.3 10 – Hauteur maximale  $S_z$  tracée en fonction du brillant spéculaire à  $60^\circ$  pour les 12 configurations imprimées à la hauteur  $h = 50 \mu\text{m}$ .

### 2.2.2 Asymétrie

Une valeur de  $S_{sk}$  négative indique que la surface considérée présente des vallées profondes et fines. Positive, la valeur indique que la surface présente des pics sur un plan. On voit Figure B.3 11 que les imprimés ont un  $S_{sk}$  positif (à l'exception de L et J). Comme ils sont formés par des piliers d'encre ajoutés sur un plan, leur asymétrie positive était attendue. Pour certaines configurations (L, J, K, ou G à  $80 \mu\text{m}$ ), l'asymétrie est quasi nulle : la distribution des hauteurs apparaît symétrique ; les piliers sont moins lisibles. Aucune corrélation avec le brillant n'est visible.

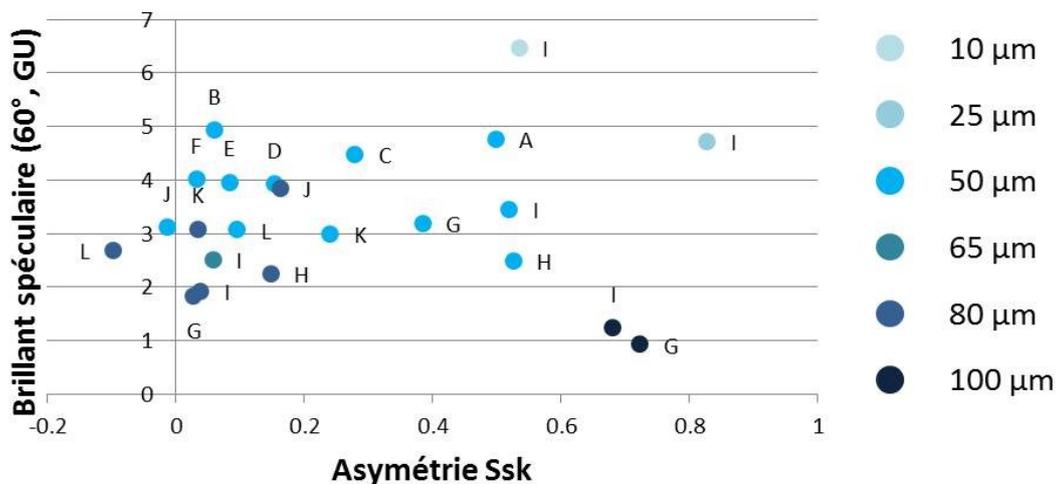


Figure B.3 11 – Asymétrie  $S_{sk}$  tracée en fonction du brillant spéculaire à  $60^\circ$ .

### 2.2.3 Aplatissement

Une valeur de  $S_{ku}$  supérieure à la valeur 3 signale une surface composée de pics, tandis qu'un  $S_{ku}$  inférieur à 3 signale une surface composée de bosses. On voit Figure B.3 12 que les imprimés se répartissent des deux côtés de cette valeur seuil. Avec un  $S_{ku} > 3$ , on trouve les surfaces imprimées à faible hauteur, et les configurations à petits piliers (A, B). On note aussi la présence de J et L, qui malgré une hauteur élevée (80  $\mu\text{m}$ ), ne créent manifestement pas un relief important. Du côté  $S_{ku} < 3$ , on trouve les configurations à larges piliers (G, H, I) et les configurations imprimées à hauteur élevée. Quand la hauteur est suffisamment élevée, le relief créé correspond réellement à des piliers, et non plus seulement à des pics irréguliers. Les stratégies qui présentent un  $S_{ku} > 3$  ont toutes un niveau de brillant spéculaire supérieur à 2.5 GU. Pour descendre encore plus bas en mat, il faut visiblement un  $S_{ku} < 3$ . L'aplatissement est corrélé avec le brillant spéculaire à 60° : plus le brillant augmente, plus l'aplatissement diminue.

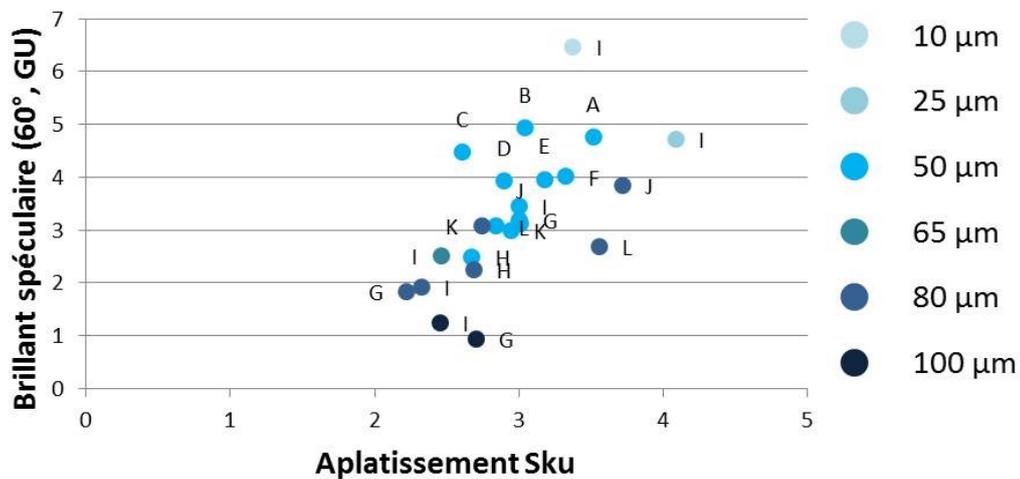


Figure B.3 12 – Aplatissement  $S_{ku}$  tracée en fonction du brillant spéculaire à 60°.

### 2.2.4 Rugosité quadratique

Le tracé de la rugosité quadratique  $S_q$  en fonction du brillant spéculaire à 60° présenté Figure B.3 13 rappelle les courbes précédentes, où le brillant était tracé en fonction de la hauteur implémentée. La rugosité quadratique est une caractéristique réelle des surfaces que nous avons créées. Elle est plus pertinente que la hauteur maximale puisqu'elle est calculée statistiquement sur l'ensemble de la surface considérée.

On voit bien Figure B.3 13 la décroissance quasi linéaire du brillant avec la rugosité. A nouveau, on remarque que les configurations A, B, C, D, E ou F ont une rugosité quadratique plus faible que les autres, et par conséquent un niveau de brillant plus élevé. Le brillant dépend clairement de la rugosité quadratique. Cela est mis en valeur Figure B.3 14. H apparaît comme la configuration qui donne les rugosités les plus hautes (donc les niveaux les plus mats) ; mais nous avons vu que son comportement n'était pas facilement modélisable. G et I,

configurations robustes aux piliers larges, restent des choix pertinents.  $S_q$  est un paramètre plus pertinent que  $S_z$ , car statistiquement plus fiable.

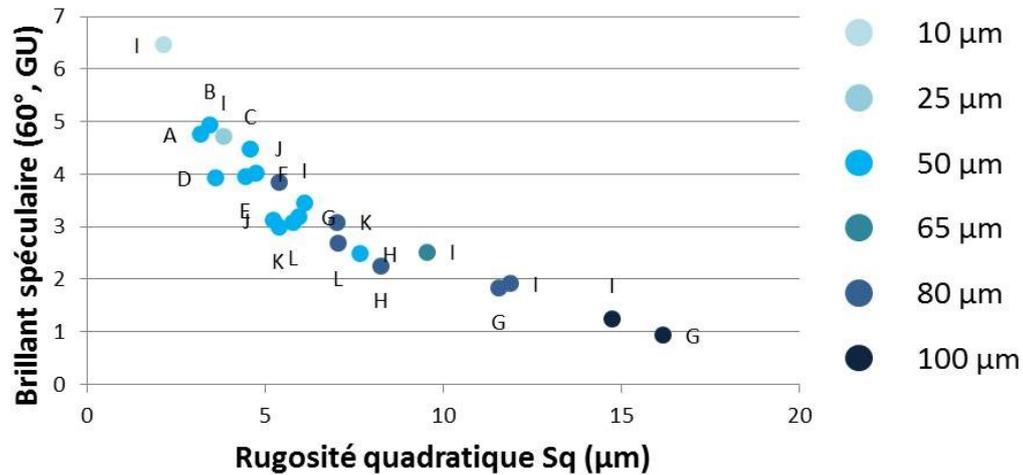


Figure B.3 13 – Rugosité quadratique  $S_q$  tracée en fonction du brillant spéculaire à  $60^\circ$ .

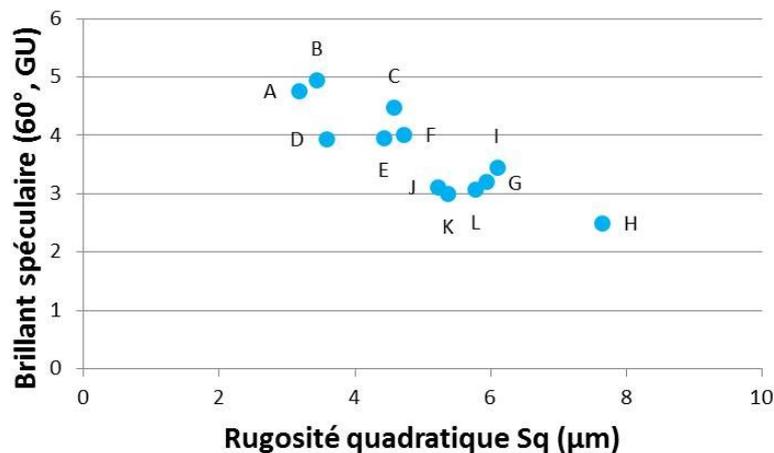


Figure B.3 14 – Rugosité quadratique  $S_q$  tracée en fonction du brillant spéculaire à  $60^\circ$  pour les 12 configurations imprimées au milieu de la gamme ( $h = 50 \mu\text{m}$ ).

La rugosité quadratique pour la seule configuration I est tracée Figure B.3 15. Le modèle empirique issu de ces mesures est donné Table B.3 6. A la différence des modèles précédemment établis, il est issu de résultats de mesure et non d'indications numériques. La Figure B.3 15, d'allure exactement similaire à celle de la Figure B.3 6, valide les résultats précédents : en indiquant à l'imprimante une simple hauteur de couches à créer, la rugosité du relief créé suit une fonction d'allure semblable, décroissante en brillant.

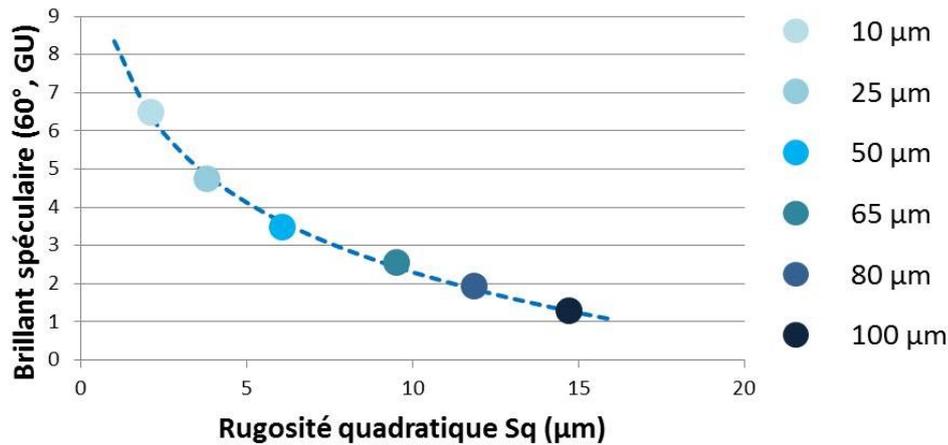


Figure B.3 15 – Rugosité quadratique  $S_q$  tracée en fonction du brillant spéculaire à  $60^\circ$  pour la seule configuration I, pour 6 hauteurs implémentées. En pointillés, on a tracé la fonction modèle issue des mesures.

Configuration	Modèle	Coefficient de Pearson
I	$gloss(60^\circ) = -2.6279 \times \ln(h) + 8.3498$	99.8 %

Table B.3 6 – Modèle empirique issu de la courbe expérimentale qui décrit l'allure du brillant spéculaire à  $60^\circ$  en fonction de la rugosité quadratique  $S_q$  des surfaces.

## 2.3 Transition

La mesure de la rugosité nous éclaire sur l'aspect des surfaces, tant visuellement que quantitativement. Visuellement, les topographies extraites nous renseignent sur la répartition des piliers : les piliers sont assez écrasés, à cause des défauts d'impression, ce qui rompt leur périodicité. Quantitativement, les différentes valeurs de rugosité extraites permettent de trier les stratégies d'impression.

## 3. A propos de la mesure du brillant spéculaire

Pour le moment, nous avons caractérisé les imprimés par la mesure du brillant spéculaire à  $60^\circ$  et par la mesure de rugosité. Nous souhaitons justifier ici notre mesure du brillant spéculaire en la mettant en regard avec des mesures de BRDF et une courte expérience psycho-visuelle. Nous mentionnerons également la présence d'effets visuels à la surface des échantillons.

### 3.1 Différents effets visuels présents

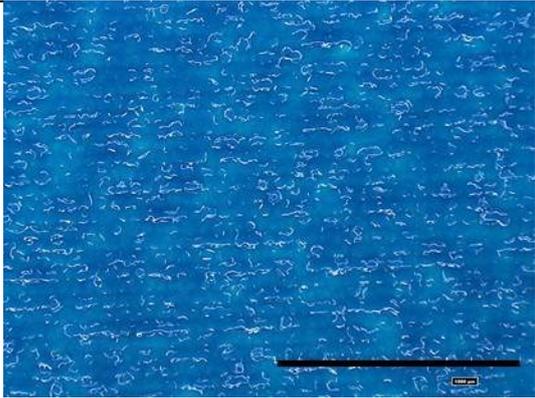
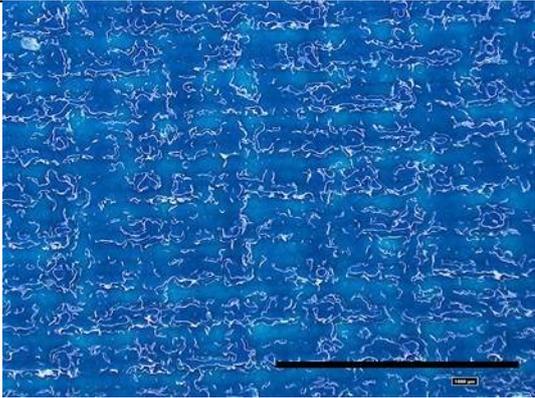
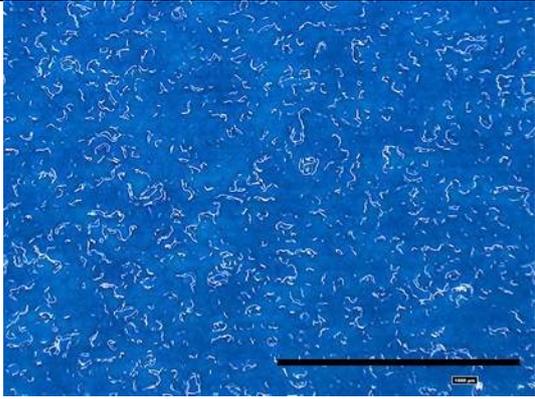
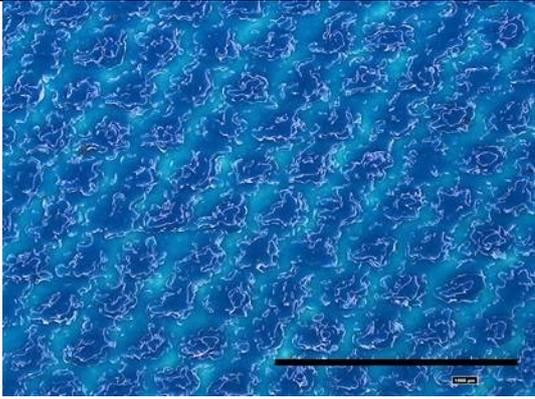
Lorsqu'on saisit les imprimés, on perçoit tout de suite différents effets visuels. Effet scintillant, présence d'une micro-texture, lustre... La perception du brillant est rendue difficile par ces effets parasites.

### 3.1.1 Scintillant

L'effet le plus gênant est le **scintillant** (*sparkle*) : selon l'angle d'éclairage, des paillettes brillantes se forment à la surface des imprimés mats. Lors de l'évaluation visuelle du gloss, au cours de laquelle l'utilisateur est amené à bouger l'échantillon ou la tête, cet effet est immédiatement perçu. Le scintillement n'est pas mesuré par le glossmètre. Il pourrait être déduit des mesures de rugosité s'il n'était fonction que des facettes des piliers, mais c'est oublier les propriétés internes de l'encre. Nous présenterons les problématiques propres au scintillement et à sa mesure en fin de chapitre.

### 3.1.2 Texture

Le second effet visuel perceptible est la **texture**. Celle-ci est causée par les piliers périodiques implémentés. Certaines configurations créent des textures moins visibles que celles de G ou I, mais en pratique, les objets imprimés sont considérés à une distance d'observation trop grande pour que la texture soit visible. La texture des imprimés est visible sous microscope. Nous présentons les différentes textures Table B.3 7.

	Prises de vue au microscope		Prises de vue au microscope
A		G	
B		H	

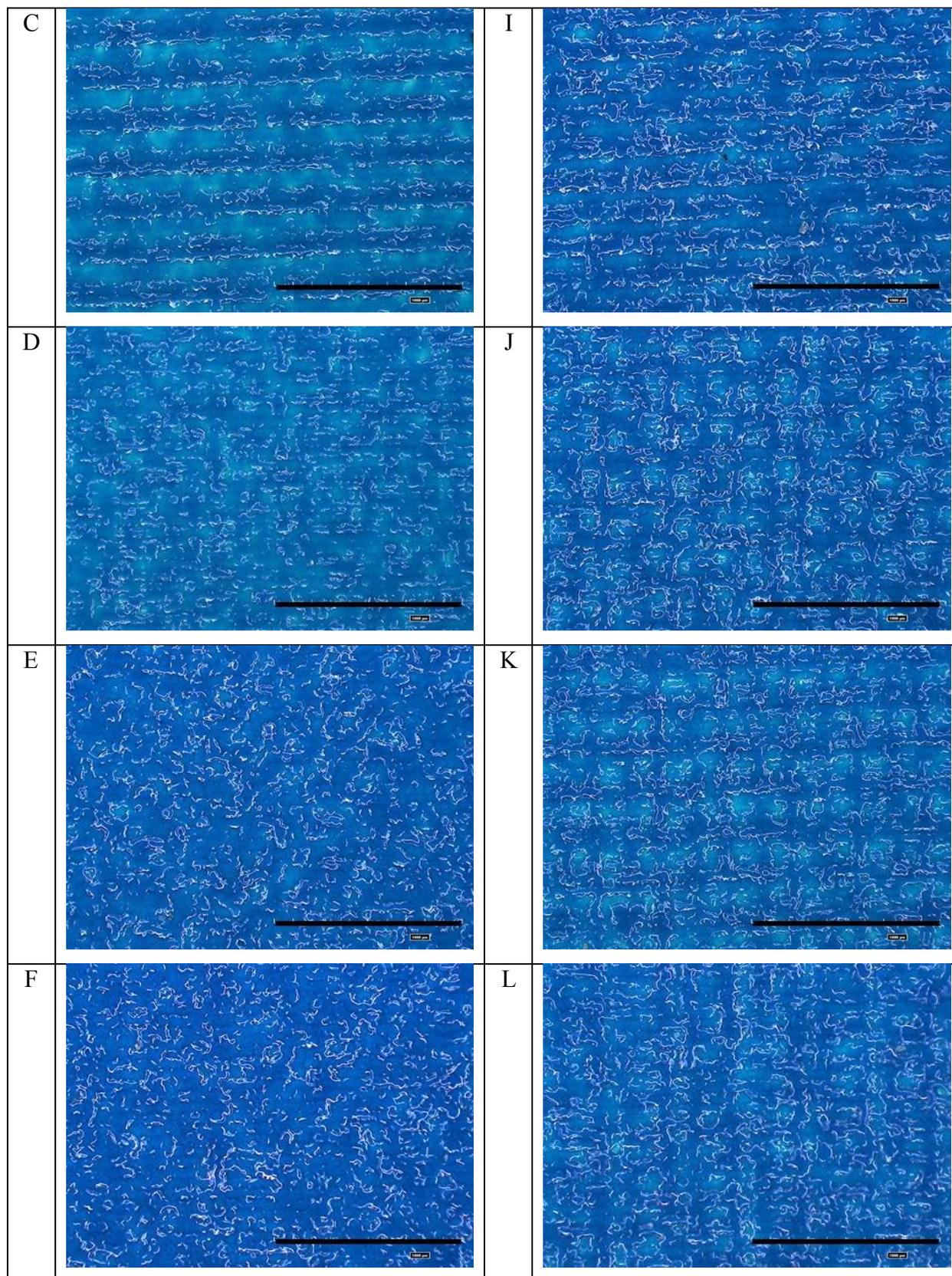


Table B.3 7 – Prises de vue sous le microscope numérique Hirox™ des configurations A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K et L imprimées à la hauteur 50  $\mu\text{m}$ . La barre d'échelle signale 1 mm.

## 3.2 Bien-fondé de la mesure spéculaire

La mesure du brillant spéculaire est-elle pertinente ? Premiers éléments de réponse.

### 3.2.1 Variabilité du brillant spéculaire avec la direction d'impression

Le brillant spéculaire à  $60^\circ$  est tracé Figure B.3 16 pour les trois configurations E, G et I. Le glossmètre est tourné sur l'échantillon comme indiqué sur la Figure B.3 3 et cinq mesures sont effectuées dans chacune des 8 directions.

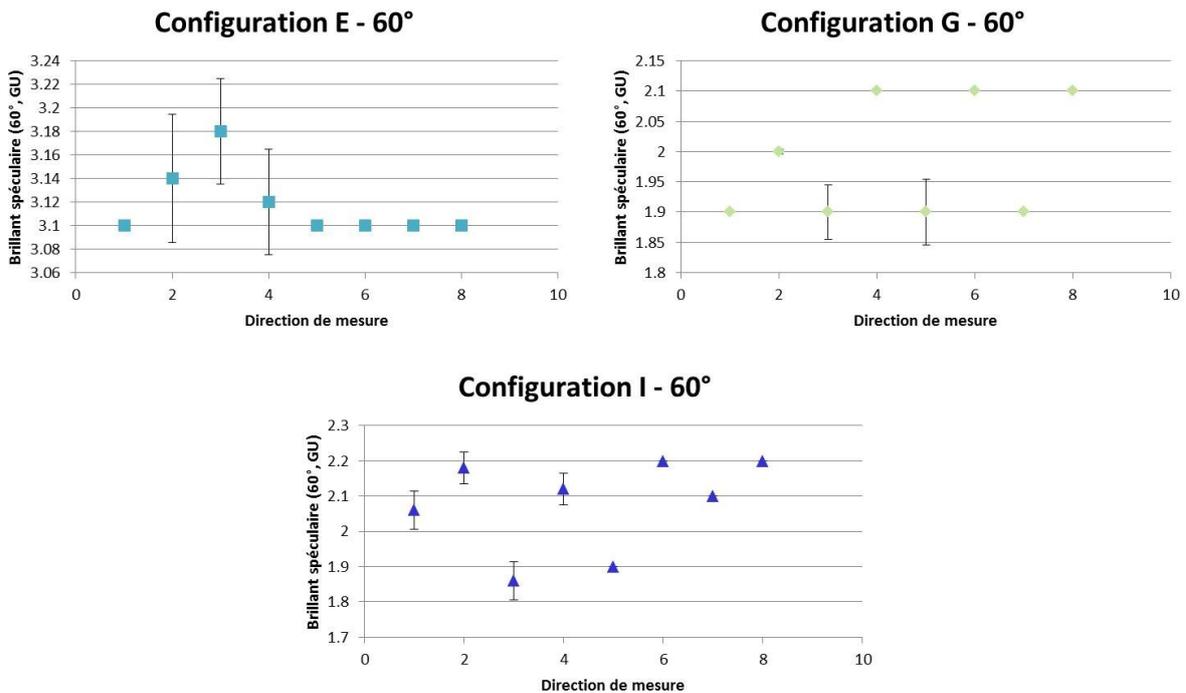


Figure B.3 16 – Brillant spéculaire à  $60^\circ$  des configurations E, G et I en fonction de la position de mesure du glossmètre sur l'échantillon, pour des piliers de  $80\ \mu\text{m}$ .

On voit que la configuration E ne présente aucune différence dans la mesure du brillant liée à la direction de mesure (l'écart est extrêmement faible, inférieure à 0.1 GU : on voit les défauts de l'instrument et non les différences de la surface). La configuration E est donc isotrope. Pour les configurations G et I, il est moins évident de conclure. La différence perçue est-elle causée par le glossmètre ou la surface ? La stratégie G montre un écart net entre le brillant mesuré dans les directions 1, 3, 5, 7 et les diagonales. C'est une conséquence de la structure périodique et très régulière de cette configuration : ses trames présentent des faces dans toutes les directions, l'encre s'étalant au cours de l'impression. Sur I, cet effet est moins net, car la structure est décalée ; l'encre n'offre plus de diagonale privilégiée.

Ainsi, moyenner les mesures du glossmètre sur l'ensemble de la surface paraît cohérent pour les configurations E et I, isotropes à la mesure. Pour la configuration G, nous choisissons de continuer à moyenner dans toutes les directions pour prendre en compte toutes les variations de brillant. On recommandera tout de même l'utilisation de E ou I à la place de G, qui n'est pas isotrope en gloss à la mesure au glossmètre.

### 3.2.2 Brillant spéculaire, brillant de contraste ou sheen ?

D'après la classification de Hunter [45], deux types de brillant peuvent être mesurés sur les surfaces mates : le brillant de contraste (lustre) et le brillant à incidence rasante (sheen).

- Pour évaluer le brillant de contraste, il faut comparer la luminosité de l'échantillon dans la direction spéculaire avec la luminosité perçue dans une autre direction. Cette mesure est faite dans l'industrie textile, mais aucun instrument industriel n'a été développé pour son acquisition [44].
- Le sheen est perçu aux incidences rasantes, supérieures à  $85^\circ$ . L'industrie du papier a développé une instrumentation spécifique, mais la mesure du sheen n'est pas intégrée aux glossmètres industriels.

Les développements industriels actuels des glossmètres ne nous donnent pas accès à un autre paramètre que le brillant spéculaire, à  $60^\circ$  ou  $85^\circ$ . Pour caractériser plus avant la surface, il nous faudra changer d'instrumentation et donc d'information.

### 3.2.3 BRDF

Nous avons effectué quelques mesures de BRDF au moyen du MiniDiff™ développé par la société LightTech™. Sa résolution de  $0.1^\circ$  est suffisante dans notre cas puisque nous considérons des surfaces mates.

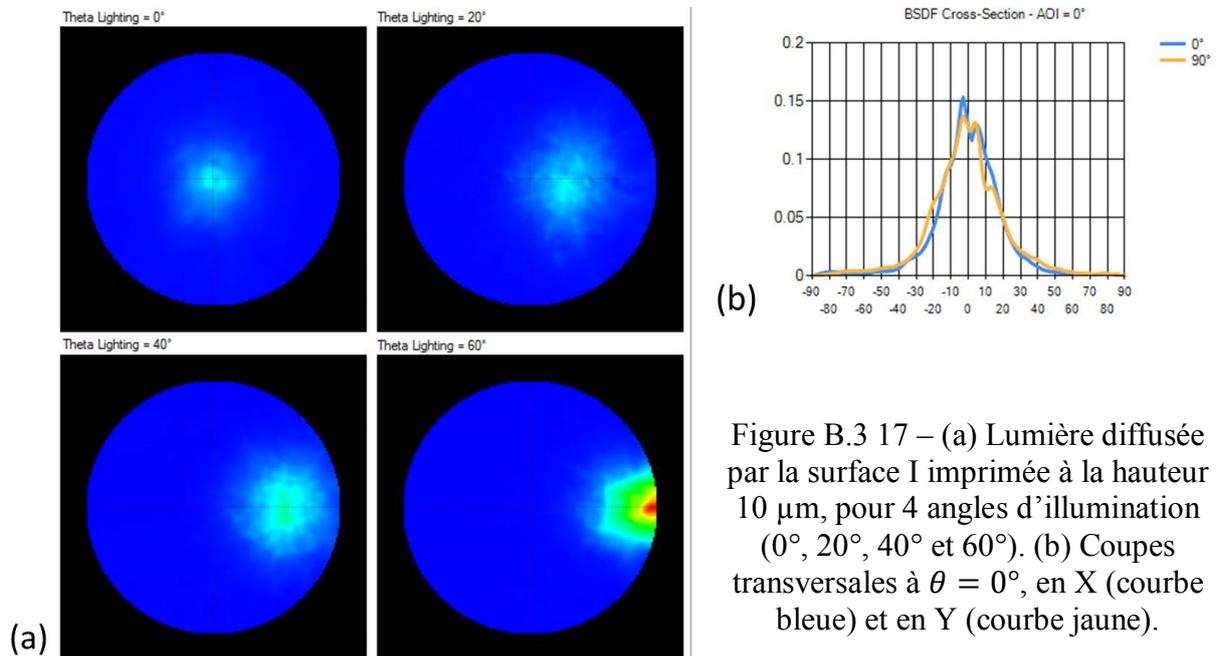


Figure B.3 17 – (a) Lumière diffusée par la surface I imprimée à la hauteur  $10\ \mu\text{m}$ , pour 4 angles d'illumination ( $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$  et  $60^\circ$ ). (b) Coupes transversales à  $\theta = 0^\circ$ , en X (courbe bleue) et en Y (courbe jaune).

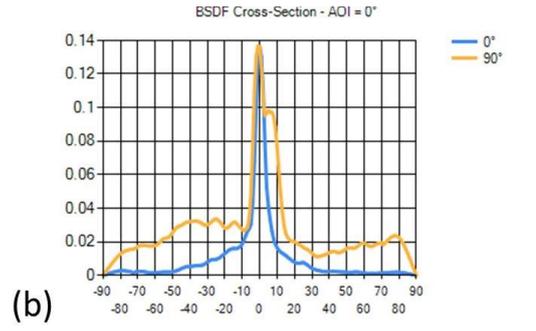
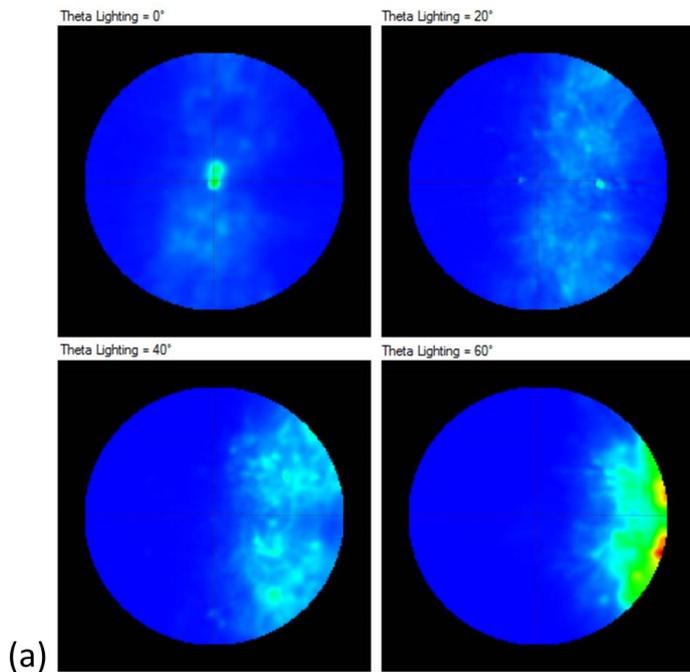


Figure B.3 18 – (a) Lumière diffusée par la surface I imprimée à la hauteur 80  $\mu\text{m}$ , pour 4 angles d'illumination ( $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$  et  $60^\circ$ ). (b) Coupes transversales à  $\theta = 0^\circ$ , en X (courbe bleue) et en Y (courbe jaune).

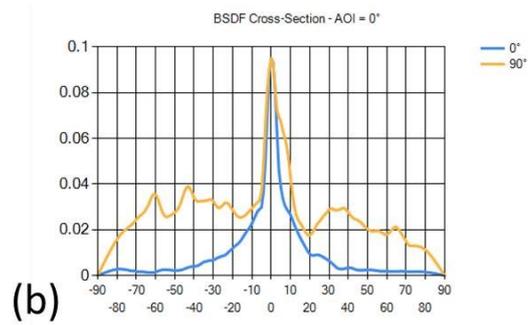
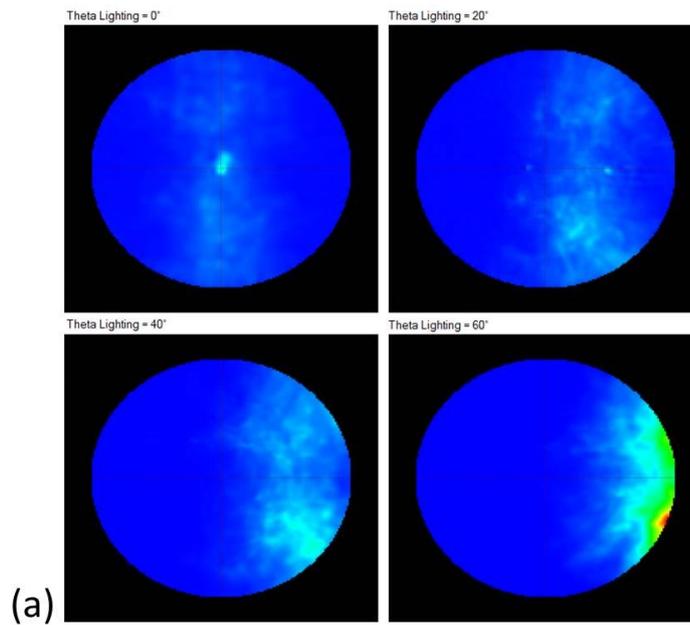


Figure B.3 19 – (a) Lumière diffusée par la surface G imprimée à la hauteur 80  $\mu\text{m}$ , pour 4 angles d'illumination ( $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$  et  $60^\circ$ ). (b) Coupes transversales à  $\theta = 0^\circ$ , en X (courbe bleue) et en Y (courbe jaune).

On voit Figure B.3 17 et Figure B.3 18 l'évolution entre les surfaces imprimées à petite hauteur (10  $\mu\text{m}$ ) et à hauteur plus élevée (80  $\mu\text{m}$ ). Dans le cas des petites hauteurs, la lumière diffusée est concentrée dans un lieu de l'espace assez restreint ; la tache centrale est large ; la coupe de la BRDF fait état d'un rayonnement peu intense mais étalé. Dans le cas de la hauteur plus élevée, la lumière est diffusée dans tout l'espace : ce qui est bien caractéristique des surfaces mates.

Les Figure B.3 18 et Figure B.3 19 présentent deux surfaces mates : les configurations G et I imprimées à 80  $\mu\text{m}$ . Cette fois-ci, la différence entre les deux surfaces est moins nette. L'information fournie par la BRDF est trop riche pour que l'on puisse extraire un marqueur qui nous permettrait de classer les surfaces. Discriminer les surfaces mates devient très complexe. Le glossmètre, qui intègre le flux réfléchi, a la résolution pour discriminer les surfaces mates. Il est donc bien l'outil adapté à notre étude.

### 3.2.4 Distance d'observation

Notons tout de même que la distance d'observation des imprimés, dans le cadre de ce travail, est grande : si un imprimé à vocation muséographique venait à être imprimé, il serait observé à une certaine distance (jusqu'à quelques mètres). L'aspect illusionniste prime donc dans ce travail. Nous verrons dans le chapitre suivant que le scintillement reste un ennui, même à assez grande distance.

## 3.3 Brillant spéculaire et perception visuelle du mat

### 3.3.1 Problématique

Comme nous l'avons vu dans la Partie A, le brillant est un attribut visuel. Au début de ce chapitre, nous avons montré qu'il était possible de classer au glossmètre différents échantillons imprimés selon la hauteur de leurs piliers. La question est la suivante : ce classement a-t-il un sens du point de vue visuel ? Un observateur établirait-il la même échelle ? Nous avons vu grâce aux études de Judd et Hunter [53], Obein [52] et Ji [112] que l'œil humain est très sensible dans la « zone des mats » à des écarts relativement faibles mesurés au glossmètre.

Hauteur des piliers ( $\mu\text{m}$ )	Gloss ( $60^\circ$ , GU)
10	7.9
15	6.0
25	3.3
30	3.2
50	1.7
65	1.3
80	0.9
100	0.6

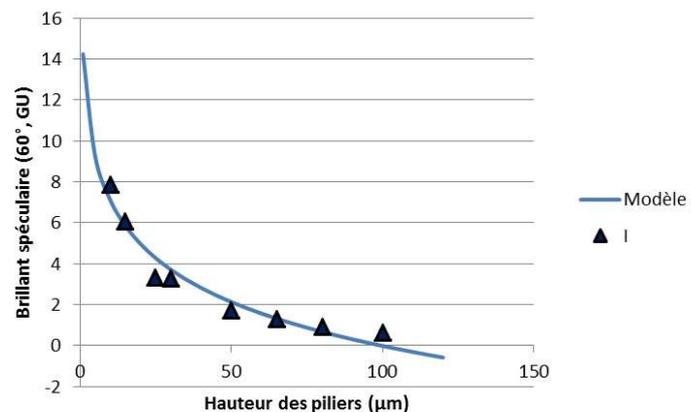


Figure B.3 20 – Corrélation entre la hauteur des piliers et le brillant spéculaire. A gauche, les mesures. A droite, la représentation graphique et le modèle associé.

Notons tout de même que les échelles visuelles [53, 52, 112] présentent peu de points dans la zone mate. On ne peut que regretter ce manque : 10 échantillons allant de 1 à 95 GU dans le cas de l'étude d'Obein, dont seulement 2 de brillant spéculaire inférieur à 5 GU [52] ; 84 échantillons sur toute la gamme de brillant de Ji [112]. L'étude de Ji *et al.* [112] est celle qui

présente l'échantillon le plus mat, à 0.2 GU, parmi 20 échantillons présentés comme mats, mais dont les valeurs en GU ne sont pas données. L'étude de Judd et Hunter semble présenter le plus de résultats dans la gamme qui nous intéresse, 0 – 10 GU, mais seule Ji *et al.* [112] permet la classification d'échantillons très mats.

### 3.3.2 Expérience psychophysique

Afin de nous assurer que le brillant spéculaire à 60° corrèle positivement avec la sensation visuelle de matité, dans la zone 0 – 10 GU, nous avons demandé à un panel d'observateurs de classer 8 échantillons. Les échantillons sont des imprimés à la configuration I, aux hauteurs précisées Figure B.3 20 (de 10 à 100 µm). Les chiffres sont remplacés par des symboles pour ne pas guider les participants. Les échantillons sont en encre noire, imprimés sur Dibond™, un fond blanc légèrement brillant (Figure B.3 21). Les participants sont placés face aux échantillons, sur fond noir, sous un éclairage formé par 5 tubes fluorescents placés derrière un diffuseur. De par la notion de constance de brillant [52], il ne nous a pas semblé nécessaire de fixer la direction d'illumination et d'observation. L'observateur est laissé libre de ses mouvements. Il travaille à la distance de lecture. Le paradigme est le suivant :

« Pouvez-vous classer ces échantillons sur une échelle allant du plus mat au plus brillant ? »

Vingt-cinq observateurs ont participé à l'expérience. Ils sont répartis selon les caractéristiques suivantes :

Sexe		Expérience dans le domaine de l'apparence		Age			
Hommes	Femmes	Oui (expérimentés)	Non (naïfs)	20 – 30 ans	30 – 40 ans	40 – 50 ans	50 – 60 ans
14	11	7	18	15	4	4	2

Table B.3 8 – Répartition des participants.

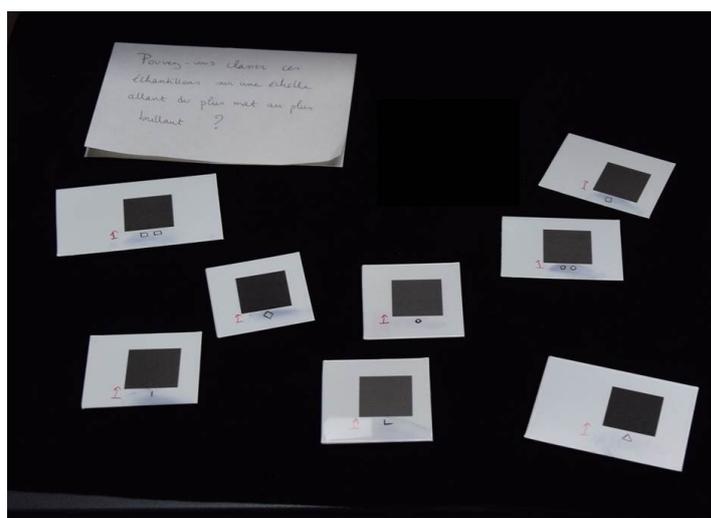


Figure B.3 21 – Les 8 échantillons utilisés pour l'expérience psycho-visuelle.

### 3.3.3 Résultats : perception visuelle du mat...

...ou plutôt du « satiné ». C'est le mot qui est constamment ressorti : les échantillons ont un aspect satiné plutôt que réellement mat. Certains observateurs ont aussi employé le terme « velours ».

Hauteur commandée des piliers ( $\mu\text{m}$ )	Hauteur réelle des piliers ( $S_z$ , $\mu\text{m}$ )	Brillant mesuré au glossmètre ( $60^\circ$ , GU)	Classement moyen de l'échantillon pour les observateurs	Ecart-type
10	16.4	7.9	6.64	0.76
15	<i>n.c.</i>	6	5.84	0.89
25	28.1	3.3	4.68	0.90
30	<i>n.c.</i>	3.2	4.44	0.87
50	42.3	1.7	2.68	0.75
100	83.0	0.6	1.64	1.87
65	74.1	1.3	1.36	0.95
80	97.0	0.9	0.72	0.61

Table B.3 9 – Résultats du test psycho-visuel.

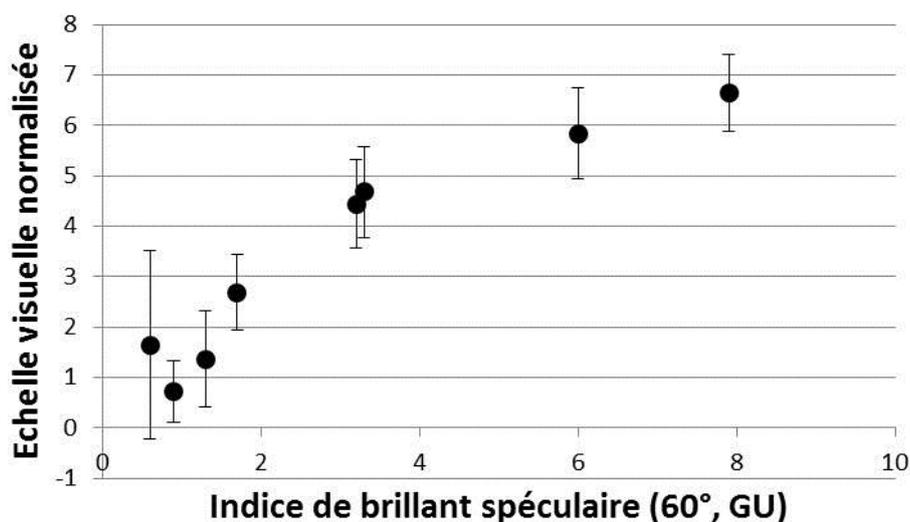


Figure B.3 22 – Moyenne reçue au test psycho-visuel en fonction du brillant spéculaire à  $60^\circ$  mesuré.

La Table B.3 9 et la Figure B.3 22 présentent les résultats moyennés du test sur tous les observateurs. Les moyennes permettent de classer les échantillons de manière perceptuelle, du plus brillant au plus mat (Table B.3 10). L'écart-type calculé résume l'inconfort avec lequel sont placés certains échantillons :  $I_{100}$  en particulier, à l'écart-type très élevé, est clairement mal commode.

	Du plus mat au plus brillant
Classement du glossmètre	$S_{100} < S_{80} < S_{65} < S_{50} < S_{30} < S_{25} < S_{15} < S_{10}$
Classement des observateurs	$S_{80} < S_{65} < S_{100} < S_{50} < S_{30} < S_{25} < S_{15} < S_{10}$

Table B.3 10 – Classement qui découle des résultats du test psycho-visuel.

Plusieurs choses sont à noter :

- Globalement, les observateurs ont tous trié les échantillons en faisant trois groupes qui correspondent aux niveaux de gloss.  $S_{10}$  et  $S_{15}$  sont les plus brillants dans 80 % des tests ;  $S_{50}$ ,  $S_{65}$  et  $S_{80}$  sont les plus mats pour tous les observateurs.
- 5 observateurs sur 25 (soit 20 % des participants) établissent exactement le même classement que le glossmètre ; la très large majorité des observateurs établissent un classement très proche de celui du glossmètre, avec quelques différences pour les échantillons les plus brillants ou les plus mats.
- La Figure B.3 22 décrit la sensation visuelle des échantillons mats comme une loi de Fechner, qui peut être modélisée par une fonction du type  $y = \log(x^8)$ ,  $x$  étant le brillant mesuré au glossmètre (en GU) et  $y$  la valeur psychométrique qui lui a été associée par l'expérience. On sait qu'une loi de ce type décrit la perception du brillant entre 10 GU et 60 GU [113], et aussi la relation perçue par un observateur entre la clarté et la luminance relative d'une surface. Il est probable que dans la zone des surfaces mates, l'observateur soit sensible aux changements de clarté.
- L'échantillon aux piliers de hauteur 100  $\mu\text{m}$  pose problème. Seuls 44 % des participants l'ont classé comme le plus mat des échantillons. Les observateurs ont noté son aspect satiné, sa tendance à montrer des « bandes » et non un aspect uniforme, et son aspect brillant selon certains angles. Selon un certain angle, ils certifient que l'échantillon est le plus mat ; mais en prenant en compte l'ensemble de l'information angulaire, l'échantillon 100 présente de nets reflets brillants. Il semblerait qu'on atteigne une limite : les piliers, quand ils sont trop hauts, présentent des facettes trop nettes dans plusieurs directions. L'œil perçoit ainsi les reflets causés par les réflexions spéculaires sur toutes ces facettes, reflets que ne voit pas le glossmètre.

On retiendra de cette expérience préliminaire qu'il est préférable d'utiliser la configuration à piliers à 80  $\mu\text{m}$ , largement classée comme la plus mate, plutôt que des hauteurs supérieures, lues mates au glossmètre, mais dérangeantes perceptuellement. Néanmoins, on peut considérer que la mesure au glossmètre est pertinente. Elle donne un classement corrélé positivement et qui concorde avec celui de l'observateur humain.

## 4. Scintillant

Nous venons de voir qu'il était possible de gérer le brillant spéculaire des imprimés en créant une couche de piliers périodiques. En ne modifiant que la hauteur de ces piliers, la rugosité est suffisamment impactée pour que le brillant spéculaire diminue jusqu'à atteindre des niveaux extrêmement mats. En particulier, nous avons vu que pour trois arrangements spatiaux aux piliers larges (112  $\mu\text{m}$ ) et relativement faiblement espacés (56  $\mu\text{m}$ ), la fonction qui décrit la décroissance en gloss en fonction de la hauteur des piliers est facilement modélisable. Ces fonctions permettent une gestion simple du procédé d'impression pour « contrôler le mat ».

Toutefois, la seule mesure du brillant spéculaire est insuffisante pour caractériser tous les effets visuels présents sur les imprimés à piliers. A ce sujet, nous avons mentionné la présence du scintillant (*sparkle*). Cet effet est visible sur de la neige au soleil : de multiples points

lumineux semblent apparaître soudainement et disparaître tout aussi vite. Sur nos échantillons, un phénomène relativement similaire semble se produire. Comment le définir, comment le quantifier, et comment le réduire pour obtenir une surface la plus uniformément mate possible ?

## 4.1 Définir l'effet scintillant

### 4.1.1 Définition spontanée

Le scintillant est une sensation éphémère produite par certains matériaux, sur lesquels on observe de multiples points lumineux. Ces mini-réflexions lumineuses sont causées par les orientations différentes de facettes réfléchissantes dans la matière : de minuscules surfaces plates dans les cristaux de glace suffisent à causer des réflexions spéculaires, tout comme des inclusions de mica dans du sable ou de la peinture [114]. Chacune des facettes étant inclinée dans une direction aléatoire différente, l'effet apparaît dès que l'orientation de la source lumineuse ou du récepteur est modifiée. Il est non-permanent : le scintillement perçu change sans cesse. La sensation résultante est plaisante à l'œil car brillante et changeante. Mais dans le cadre de notre étude, elle est indésirable, puisque nous voulons un résultat mat.

### 4.1.2 Vers une définition rigoureuse

#### 4.1.2.1 *Sparkle et graininess*

Dans un article publié en 2013 [115], Ferrero *et al.* décrit le **scintillant** (*sparkle*) comme une texture non-uniforme observée sous éclairage directionnel, à une distance d'un mètre ou moins. Le scintillement consiste en quelques points très lumineux visibles sur un fond plus sombre. Les auteurs ajoutent que sous éclairage diffus, on perçoit une texture granuleuse, appelée en conséquence **granulosité** (*graininess*). Ces deux effets sont illustrés par la Figure B.3 23.

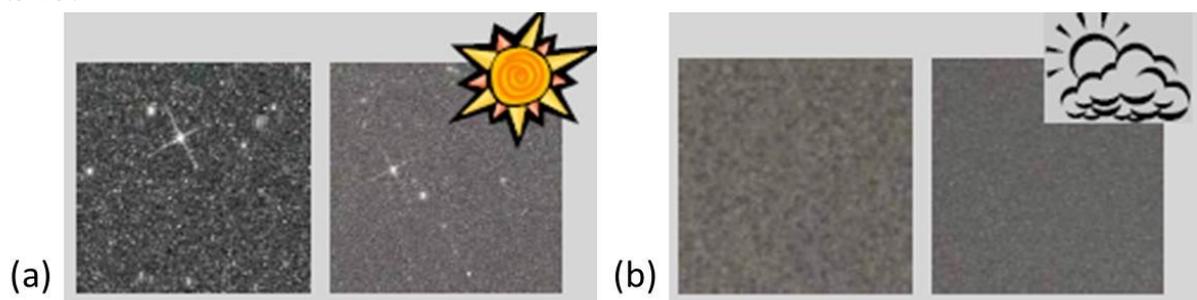


Figure B.3 23 – (a) Sparkle et (b) graininess. Image : documentation de BYK™.

#### 4.1.2.2 Importance de l'éclairage

Le type d'éclairage a toute son importance. Sous un éclairage directionnel (type ciel ensoleillé), les effets de scintillant sont visibles. Ce n'est pas le cas sous éclairage diffus (type ciel nuageux). Cela est en accord avec les simulations menées par Zhang et al. en 2015 sur l'influence de l'éclairage sur l'effet de brillant perçu [116].

#### 4.1.2.3 *Apparition de cet effet*

Le scintillant apparaît lorsque de petites facettes réfléchissantes, inclinées dans un plan différent de celui de l'objet sont incluses dans le substrat. Dans le cas de la neige, les flocons qui forment la couche de neige possèdent des micro-facettes ; l'orientation des flocons détermine celles des facettes et cause donc l'effet scintillant. Dans le cas des peintures automobiles ou des cosmétiques, de petites particules de mica sont incluses dans un substrat liquide. L'orientation des particules détermine la position des points scintillants.

#### 4.1.2.4 *Modèle physique*

Dans l'article [115], Ferrero *et al.* mettent en place un modèle physique mathématique permettant de simuler l'effet de sparkle ou celui de graininess. Pour cela, les réflexions lumineuses à l'interface avec chaque micro-facette inclinée sont calculées. Pour une distribution des orientations des facettes données, le flux reçu par un récepteur peut être simulé. Dans ce modèle, sparkle et graininess apparaissent comme « deux extrêmes d'un même phénomène de réflexion » [115]. Le **contraste** entre les points brillants scintillants et le fond plus sombre va déterminer si une texture est observable ou pas (sparkle ou graininess). La **densité** des points plus clairs définit le sparkle : si la densité est faible et le contraste fort, il y a sparkle. Si la densité est très élevée et le contraste plus faible, il y a graininess. Le contraste comme la densité dépendent bien sûr de l'illumination, des géométries d'éclairage et d'observation, et de l'inclinaison des particules réfléchissantes.

### 4.1.3 Mesure du scintillant

#### 4.1.3.1 *Proposition de Ferrero*

Ferrero *et al.* proposent en 2015 un protocole de mesure du sparkle [117]. L'article définit le protocole à suivre et les grandeurs à quantifier. Les auteurs ont utilisé le GEFE (*Gonioespectrofotómetro Español*) pour faire varier conjointement les directions d'illumination et d'observation. Les caractéristiques de la source et du récepteur CCD sont données Figure B.3 24.

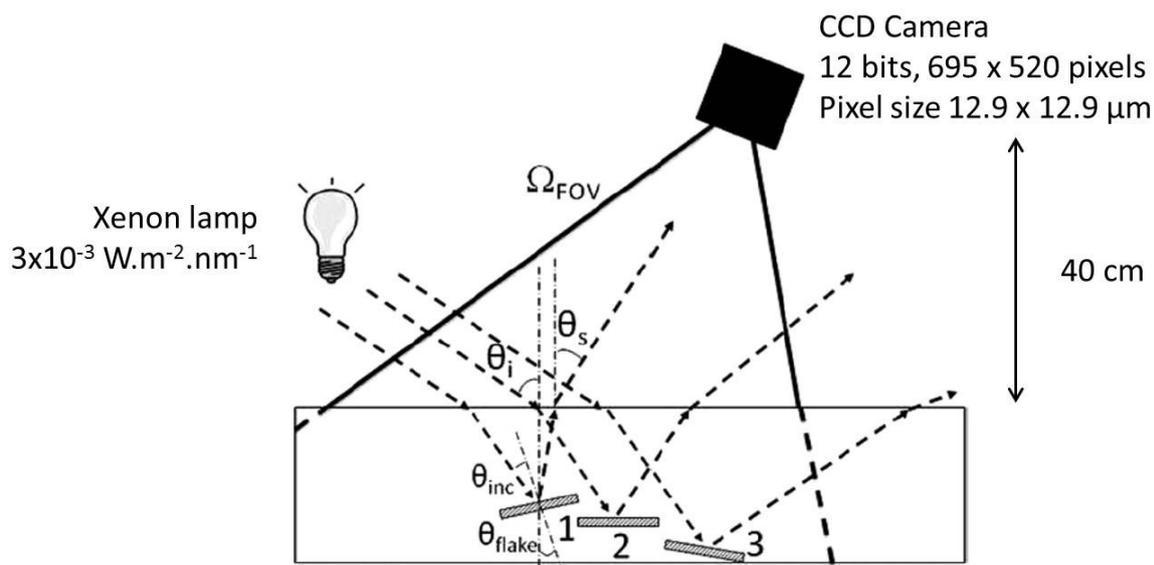


Figure B.3 24 – Protocole de Ferrero *et al.* La figure présente également les angles impliqués dans le calcul du sparkle. Ici des particules réfléchissantes sont incluses dans un substrat. Seule la particule 1 crée une réflexion visible par le détecteur. [117]

Les auteurs obtiennent des images en niveaux de gris sur lesquels sont visibles les taches de sparkle. Sur ces images, ils calculent trois grandeurs, reliés à quatre paramètres décrits dans l'article. Les trois grandeurs calculées sur les images sont :

- Le **contraste** d'une tache simple scintillante  $C_S$ , calculée comme le rapport entre le flux d'une tache de sparkle et le flux du fond qui l'entoure ;
- Le **contraste d'ensemble** des taches de sparkle  $C_{SP}$ , défini comme la médiane des contrastes  $C_S$  de valeur supérieurs à un certain seuil, positionné par Ferrero à  $C_{th} = 0.5$ .
- La **densité** des taches de sparkle  $d_{SP}$ , défini comme le nombre de taches de sparkle par aire, telle que leur contraste  $C_S$  soit supérieur à  $C_{th} = 0.5$ .

Les quatre attributs visuels reliés au sparkle sont définis comme :

- La **visibilité maximale** du sparkle : ou capacité à percevoir les points de sparkle sur un support donné, relié à la valeur maximale de  $C_{SP}$ .
- La **densité maximale** des points de sparkle, reliée à la valeur maximale de  $d_{SP}$ .
- L'**inconstance de la visibilité** : variation de la visibilité du sparkle avec les géométries d'illumination et d'observation, relié à la variation totale de la fonction  $C_{SP}$  par rapport à son maximum.
- L'**anisotropie** : variation de la densité du sparkle avec les géométries d'illumination et d'observation, relié à la variation totale de la fonction  $d_{SP}$  par rapport à son maximum.

Le calcul de chacun de ces paramètres est explicité dans l'article.

#### 4.1.3.2 Un sujet d'étude actuel pour la CIE

Les paramètres proposés par l'équipe de Ferrero n'ont pour le moment pas été validés par la Commission Internationale de l'Eclairage. Partout dans le monde, d'autres équipes travaillent

sur ce même sujet, qu'elles soient académiques (Université de Poitiers et LNE-Cnam, France, Université de Louvain, Belgique, CSIC Madrid et Université d'Alicante, Espagne, INRIM Turin, Italie, CMI Brno, République Tchèque, METAS Bern, Suisse, Université d'Ulsan, Corée...) ou industrielles (X-Rite, Apple, Konica Minolta, Audi, Merck, BASF, BYK-Gardner...). Le scintillant est donc une problématique actuelle. La CIE a ouvert en mars 2018 un comité technique commun aux divisions 1, 2 et 8 (JTC 12) pour avancer sur la mesure du sparkle : l'objectif de ce JTC est de fournir un protocole de mesure consensuel du scintillant.

## **4.2 Effet scintillant de nos imprimés**

### **4.2.1 Problématique**

Pour réduire les aspects brillants de nos encres, nous avons créé des micro-piliers à la surface de nos imprimés. Cette rugosité diminue fortement le brillant spéculaire à 60°, mesuré au glossmètre, mais elle introduit aussi une sensation de scintillement visible à l'œil qui n'est pas caractérisée par la mesure au glossmètre. Deux phénomènes semblent se superposer. Sous éclairage diffus, on aperçoit une texture visuelle assez large, plus proche de la graininess. Sous éclairage directionnel, cette texture laisse la place à des points de sparkle nets et brillants. Le premier effet, celui de « graininess », semble être causé par l'arrangement géométrique périodique de micro-facettes que l'on vient créer pour changer la sensation de brillant. Le second effet, celui de « sparkle », serait lui inhérent aux matériaux constitutifs des encres. Ce second effet ne peut être évité, puisque la composition des encres n'est pas modifiable. En revanche, il est peut-être possible d'optimiser les micro-facettes de manière à réduire au maximum le premier effet : la graininess. En conséquence, nous ne pousserons pas notre étude jusqu'à calculer les paramètres proposés par Ferrero *et al.* [9, 11]. Nous choisissons d'adapter sa mesure angulaire pour tracer des courbes de réflectivité, et comparer ainsi plusieurs stratégies d'impression.

### **4.2.2 Protocole de mesure**

Nous avons adapté le protocole proposé par Ferrero *et al.* en fonction du matériel disponible dans notre laboratoire et de nos configurations à piliers. La Figure B.3 25 donne les notations angulaires et les caractéristiques du capteur utilisé. Celui-ci est une caméra CCD Hasselblad™ possédant un capteur de 6708 par 8956 pixels. La taille d'un pixel est de 6 par 6 μm. Au cours d'une première expérience, nous utilisons comme source lumineuse une lampe halogène dichroïque, d'ouverture 24°.

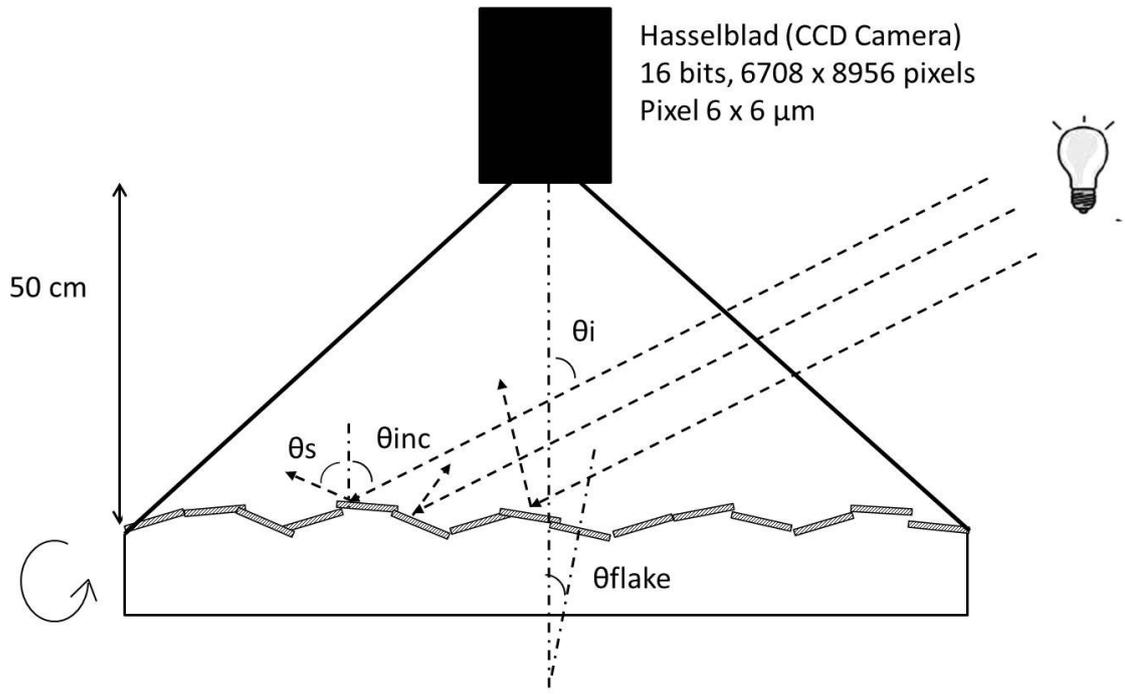


Figure B.3 25 – Notre protocole. La figure présente les angles impliqués dans le calcul du sparkle, tels qu'ils sont définis dans [117]. Les micro-facettes réfléchissantes sont figurées à la surface de l'échantillon.

Les échantillons à mesurer sont placés sur une platine dont la rotation est finement contrôlée au moyen d'une vis micrométrique. La mise au point est effectuée sur l'appareil photo. La balance des blancs est faite au moyen d'une mire dans la direction spéculaire, pour éviter la saturation du capteur. La caméra et l'éclairage sont fixes ; seul l'échantillon subit une rotation sur sa platine, d'une amplitude de  $40^\circ$  ; une prise de vue est effectuée tous les degrés, ce qui nous donne 41 images à analyser par échantillon. Les angles sont donnés par rapport à la normale, c'est-à-dire à l'axe de la caméra.

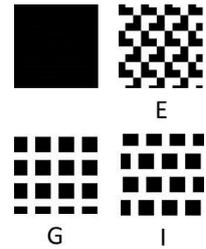
Les photographies sont ensuite recadrées sur Photoshop™, puis traitées sur Matlab™. Le calcul des points blancs est simplement effectué en convertissant l'image couleurs en niveaux de gris, et en dénombrant tous les points blancs situés au-dessus d'un certain seuil, déterminé en examinant les histogrammes des images et fixes tout au long de l'expérience.

#### 4.2.3 Résultats

Les stratégies implémentées sont données ci-après. La couleur de l'encre est toujours fixée au cyan et sauf mention du contraire, le temps d'exposition aux UV est fixé à son niveau minimal, tout comme la taille des gouttes, fixée à 1.

#### 4.2.3.1 Avec et sans piliers

Le premier test consiste à comparer les résultats obtenus pour un imprimé cyan sans piliers, de hauteur 80  $\mu\text{m}$ , avec ceux obtenus pour les imprimés cyan de configuration E, G et I, toujours à la hauteur 80  $\mu\text{m}$ . La Table B.3 11 présente quelques images obtenues et la Figure B.3 26 les courbes résultats.



	0°	12°	24°
Cyan			
E			
G			
I			

Table B.3 11 – Sélection de prises de vue réalisées à trois configuration angulaire : 0° (échantillon à plat), 12° (spéculaire) et 24° pour les échantillons cyan sans piliers, et avec piliers E, G et I.

La Table B.3 11 montre que la configuration cyan simple, sans piliers, présente bien plus de points blancs brillants que les autres. L'ajout de micro-facettes est donc bénéfique pour la réduction générale du brillant, et ceci dans toutes les configurations angulaires (et non dans la seule direction spéculaire). A l'œil, la configuration E semble présenter plus de points brillant que les configurations G et I. On notera sur G la trame régulière des points brillants (G est périodique et linéaire), tandis que I présente une répartition qui paraît plus aléatoire.

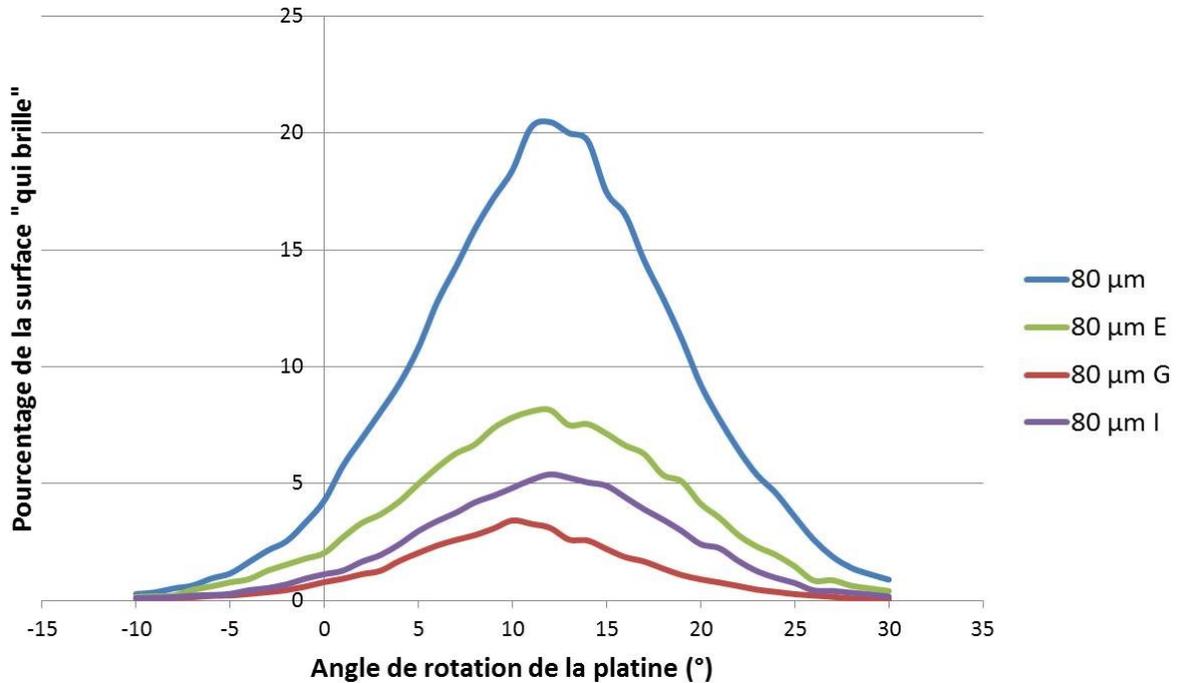
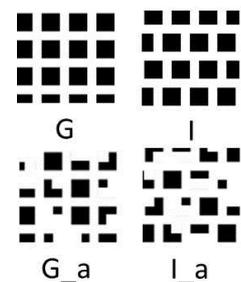


Figure B.3 26 – Courbes représentant le pourcentage de surface « blanche » en fonction de l'angle de rotation de la platine pour un imprimé sans piliers à 80 µm et les configurations E, G et I.

La Figure B.3 26 indique clairement que la stratégie G est celle qui présente le moins de réflexions « parasites ». Les courbes qu'elle présente s'apparentent à des coupes de BRDF. On y a tracé la réflectivité des surfaces : les courbes présentent un maximum dans la direction spéculaire. E, G et I présentent bien moins de réflexions que la courbe sans piliers, mais G se distingue encore par la faible présence de points brillants à sa surface.

#### 4.2.3.2 Piliers aléatoires

Lors d'un second test, nous avons implémenté des surfaces plus aléatoires, afin de briser la périodicité des configurations G et I. Nous avons vu que l'aspect mat était créé justement parce que nous avons imprimé des rugosités rigoureuses : en donnant un aspect aléatoire aux surfaces produites, nous risquons de diminuer la rugosité et donc le rendu mat. C'est pourquoi nous confinons l'aspect aléatoire à la forme du pilier, au sein d'une structure fixe. Le programme crée une surface en niveaux de gris de telle manière que le choix aléatoire se résume à celui de la forme carrée :



fera-t-elle un, deux, trois ou quatre pixels ? Dans la configuration aléatoire I, les lignes de piliers sont décalées les unes par rapport aux autres, ce qui n'est pas le cas dans la configuration aléatoire G. La Table B.3 12 présente quelques images obtenues et la Figure B.3 27 donne les courbes résultats.

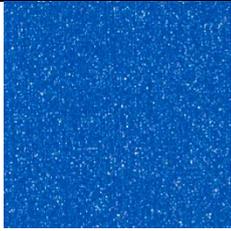
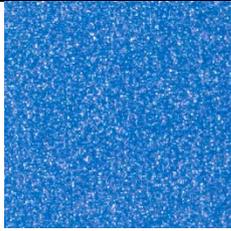
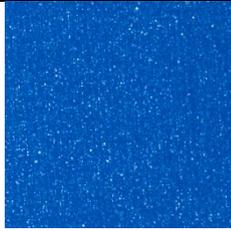
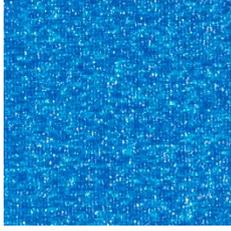
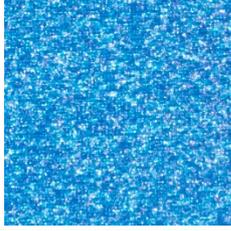
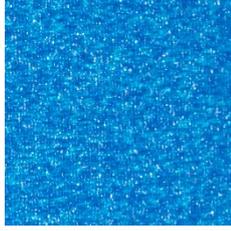
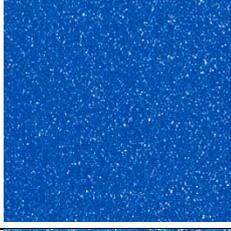
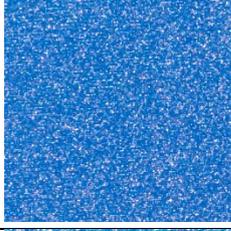
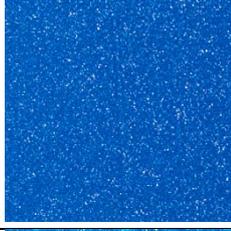
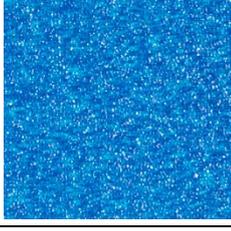
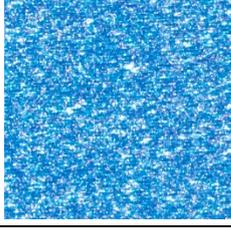
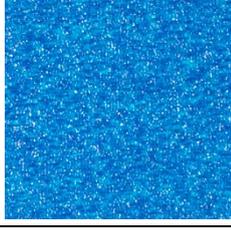
	0°	12°	24°
G			
G aléatoire			
I			
I aléatoire			

Table B.3 12 – Sélection de prises de vue réalisées à trois configuration angulaire : 0° (échantillon à plat), 12° (spéculaire) et 24° pour les échantillons à piliers réguliers G et I, et à piliers aléatoires de style G et I.

Il apparait que les configurations aléatoires n'ont pas produit l'effet escompté : les points blancs sont très nombreux à leur surface. Notons que lors de la création des surfaces aléatoires, aucun poids n'a été donné aux piliers de 3 et 4 pixels : il aurait pourtant été judicieux de le faire afin de conserver une rugosité satisfaisante.

Logiquement, la Figure B.3 27 fait état d'une réflectivité plus élevée pour les surfaces à piliers aléatoires que pour les surfaces à piliers périodiques.

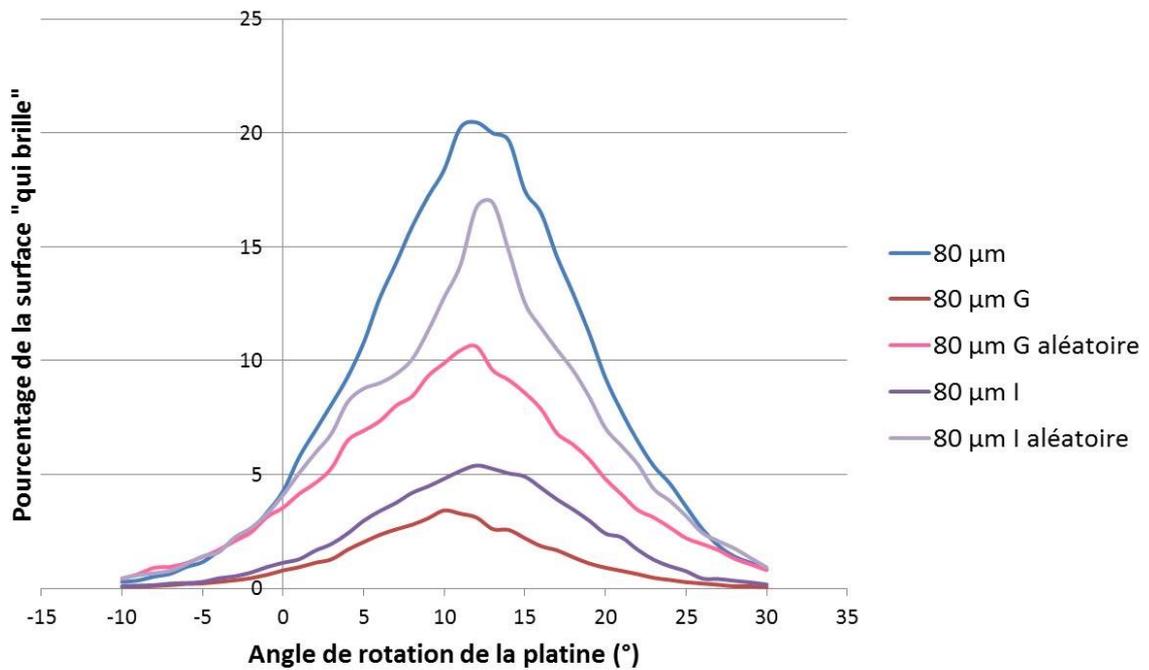
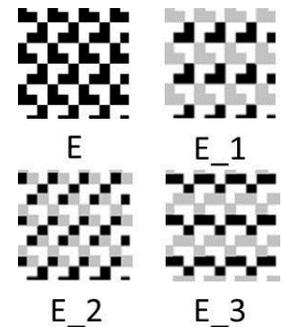


Figure B.3 27 – Courbes représentant le pourcentage de surface « blanche » en fonction de l’angle de rotation de la platine pour les configurations G, G aléatoire, I et I aléatoire.

#### 4.2.3.3 Différences de hauteurs

Pour le test suivant, nous avons créé des surfaces à piliers de hauteurs différentes. La configuration E a été choisie pour cette expérience. Trois nouvelles configurations ont été créées : dans la première, une ligne de piliers sur deux est à la hauteur 50  $\mu\text{m}$ , tandis que l’autre est à 100  $\mu\text{m}$ . Dans la seconde et la troisième, certains pixels d’un même pilier sont à 50  $\mu\text{m}$ , tandis que les autres sont à 100  $\mu\text{m}$ . L’objectif est de créer des effets d’ombrage et de modifier la graininess perçue.



La Table B.3 13 présente quelques images obtenues et la Figure B.3 28 les courbes résultats. La Table B.3 13 montre la diminution des reflets brillants quand la hauteur des piliers de la configuration E augmente. Visuellement, la différence entre les trois types de pavages implémentés et la configuration E à 100  $\mu\text{m}$  est difficilement perceptible. La Figure B.3 28 montre qu’en effet, les configurations à double hauteurs présentent bien moins de réflexions parasites que les piliers E à 50  $\mu\text{m}$  et 80  $\mu\text{m}$ . L’écart entre les types de pavages est minime, tout comme l’écart avec la configuration E à 100  $\mu\text{m}$ . Notons tout de même que le pavage E 3 présente moins de texture visuelle (cela est apparent Table B.3 13): les lignes des piliers, très nettes sur E à 80  $\mu\text{m}$ , E à 100  $\mu\text{m}$  ou le pavage 2, le sont moins sur le pavage 3. Varier les hauteurs des piliers au sein d’une même configuration rompt la périodicité des motifs tout en conservant un brillant faible.

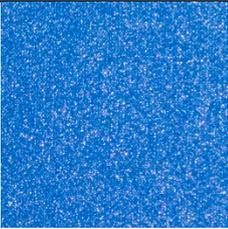
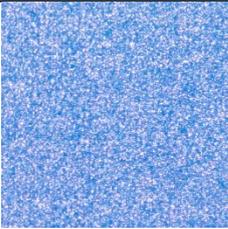
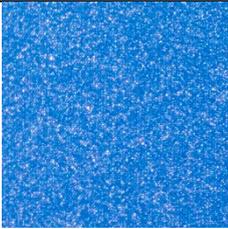
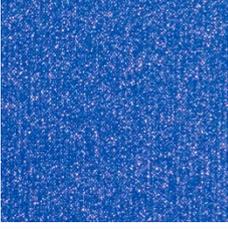
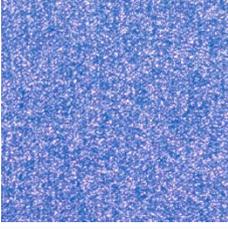
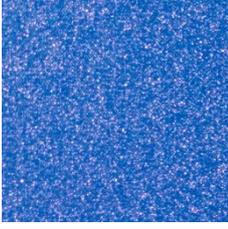
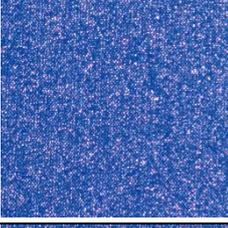
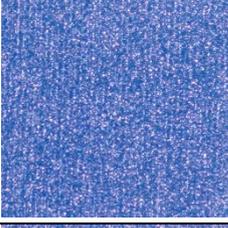
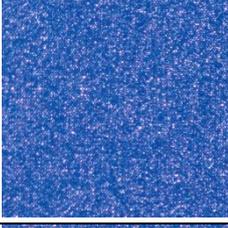
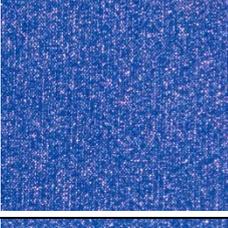
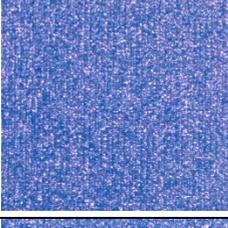
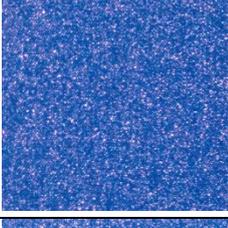
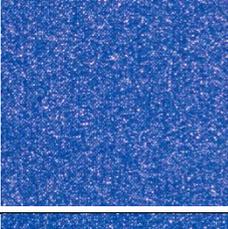
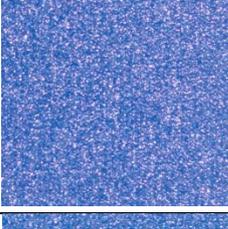
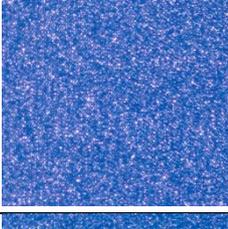
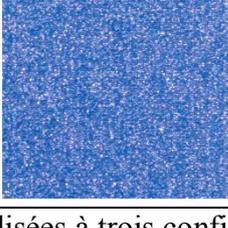
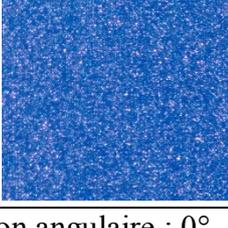
	0°	12°	24°
E 50 μm			
E 80 μm			
E 100 μm			
E_1			
E_2			
E_3			

Table B.3 13 – Sélection de prises de vue réalisées à trois configuration angulaire : 0° (échantillon à plat), 12° (spéculaire) et 24° pour les configurations E aux hauteurs 50 μm et 80 μm, puis pour les configurations E\_1, E\_2 et E\_3 à doubles hauteurs.

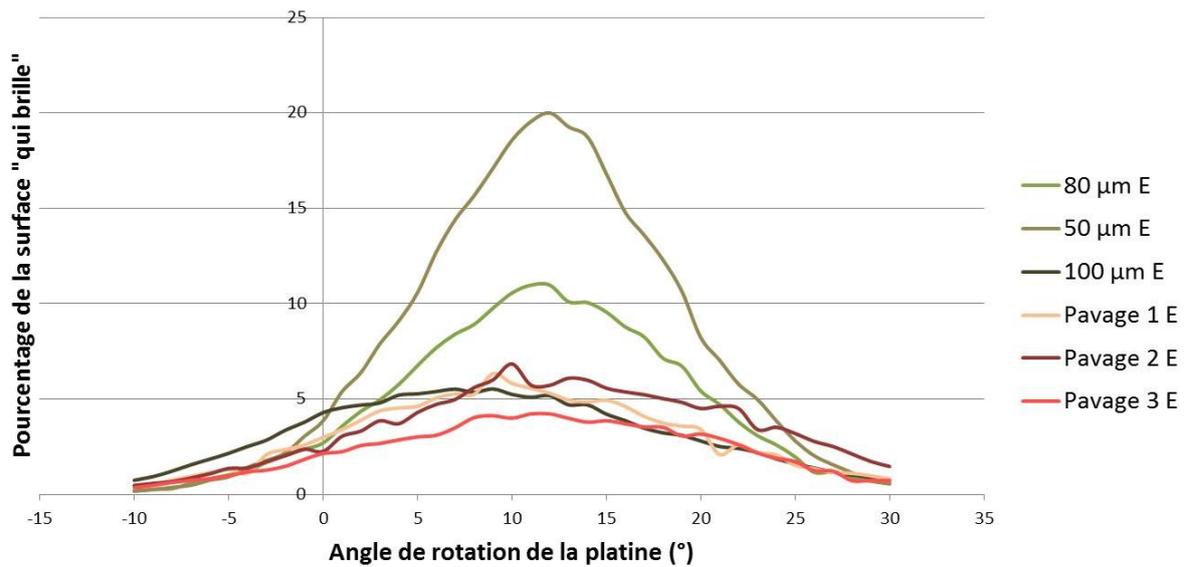


Figure B.3 28 – Courbes représentant le pourcentage de surface « blanche » en fonction de l’angle de rotation de la platine pour les configurations E à 50 μm, 80 μm, 100 μm, et aux doubles hauteurs.

#### 4.2.3.4 Influence des UV

Nous avons également comparé les résultats obtenus pour les trois temps d’expositions aux UV : minimal, intermédiaire et maximal, dans le cas de la configuration E. Les résultats sont donnés Table B.3 14 et Figure B.3 29. La différence entre les trois temps d’exposition aux UV n’est pas significative : le temps d’exposition aux UV n’a pas d’influence.

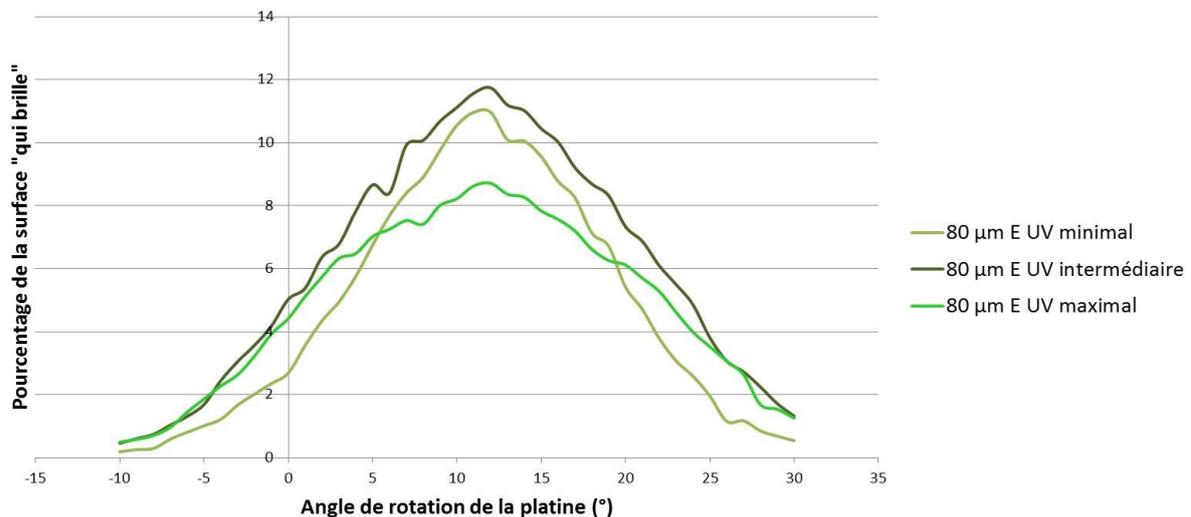


Figure B.3 29 – Courbes représentant le pourcentage de surface « blanche » en fonction de l’angle de rotation de la platine pour les configurations E aux trois temps d’exposition aux UV.

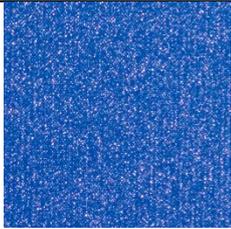
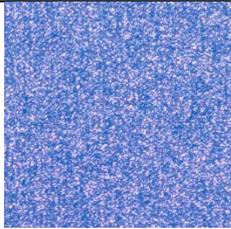
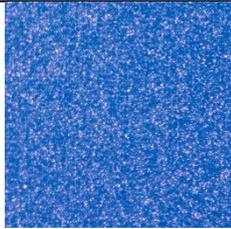
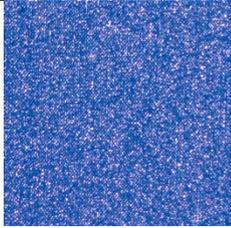
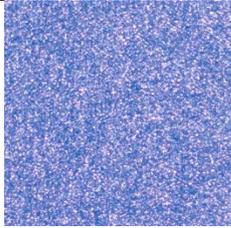
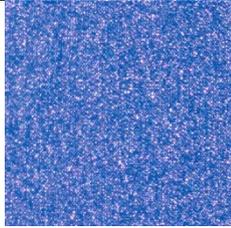
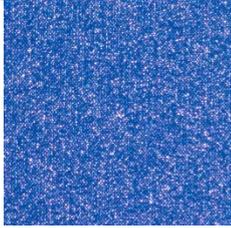
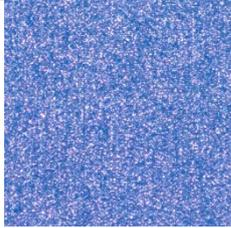
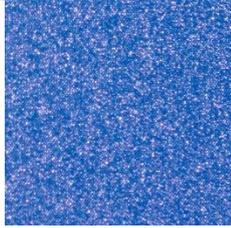
	0°	12°	24°
UV minimal			
UV intermédiaire			
UV maximal			

Table B.3 14 – Sélection de prises de vue réalisées à trois configuration angulaire : 0° (échantillon à plat), 12° (spéculaire) et 24° pour la configuration E imprimée aux temps d'exposition aux UV minimal, intermédiaire et maximal.

#### 4.2.3.5 Forme des piliers

Enfin, nous avons imprimé un échantillon à piliers de type I en superposant trois passages d'encre : un premier au niveau de goutte 5, pour obtenir de larges piliers, un second au niveau de goutte 3, puis un dernier au niveau de goutte 1. Les piliers ainsi conçus ne sont pas strictement rectangulaires, mais plutôt coniques. On compare cette configuration à un imprimé I classique, au niveau de goutte 1. Les résultats sont donnés Table B.3 15 et Figure B.3 30.



La Figure B.3 30 fait état d'un abaissement de la réflexion lumineuse à la surface de la configuration conique : le pourcentage de surface claire est presque deux fois moins élevé qu'au seul niveau de goutte 1. Il faut toutefois noter qu'on ne peut conclure uniquement en la faveur du changement de forme : la hauteur a aussi été légèrement modifiée, passant de 80 à 90 µm.

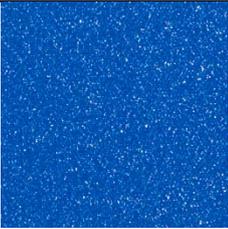
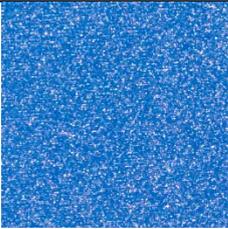
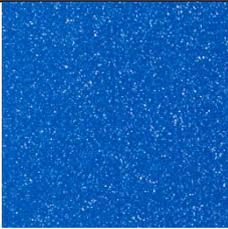
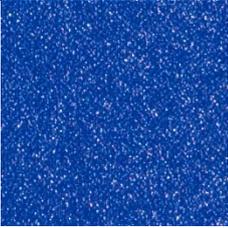
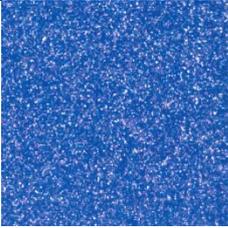
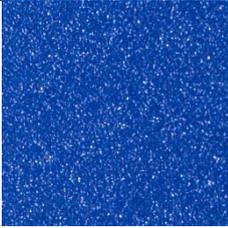
	0°	12°	24°
I rectangulaire (goutte 1)			
I conique (gouttes 1, 3, 5)			

Table B.3 15 – Sélection de prises de vue réalisées à trois configuration angulaire : 0° (échantillon à plat), 12° (spéculaire) et 24° pour la configuration I imprimée au niveau de goutte 1 et aux trois niveaux de gouttes successifs 1, 3 et 5.

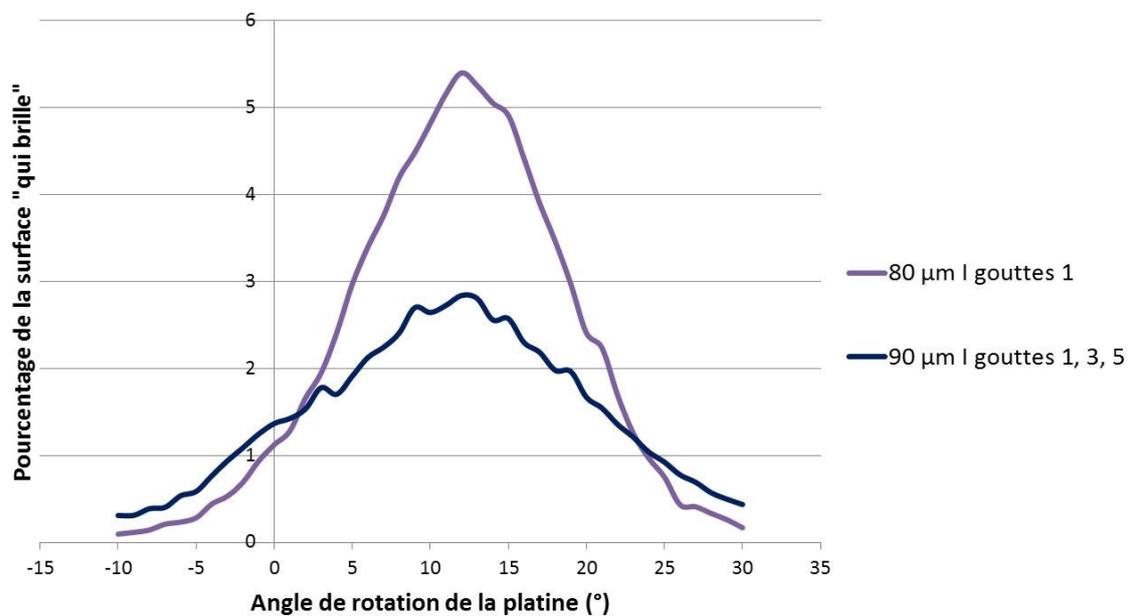


Figure B.3 30 – Courbes représentant le pourcentage de surface « blanche » en fonction de l'angle de rotation de la platine pour les configurations I au niveau de gouttes 1 ou aux trois niveaux de gouttes superposés.

#### 4.2.4 Conclusion

La Figure B.3 31 récapitule l'ensemble des courbes obtenues pour toutes les stratégies testées. Varier les hauteurs au sein d'une même configuration permet de rompre la symétrie visuelle des imprimés, mais changer le temps d'exposition aux UV ne modifie pas la réflectivité des surfaces. Créer des structures aléatoires reste une possibilité, mais il faudrait s'assurer que la rugosité reste satisfaisante. De même, varier la forme des microstructures (par exemple en jouant sur le niveau de gouttes au sein d'un même imprimé) est une piste à creuser. Les stratégies G et I restent pour le moment celles qui minimisent cet effet de brillant parasite. G

étant un peu trop régulière (ce qui crée une texture physique visible pour un observateur), nous lui préférons I.

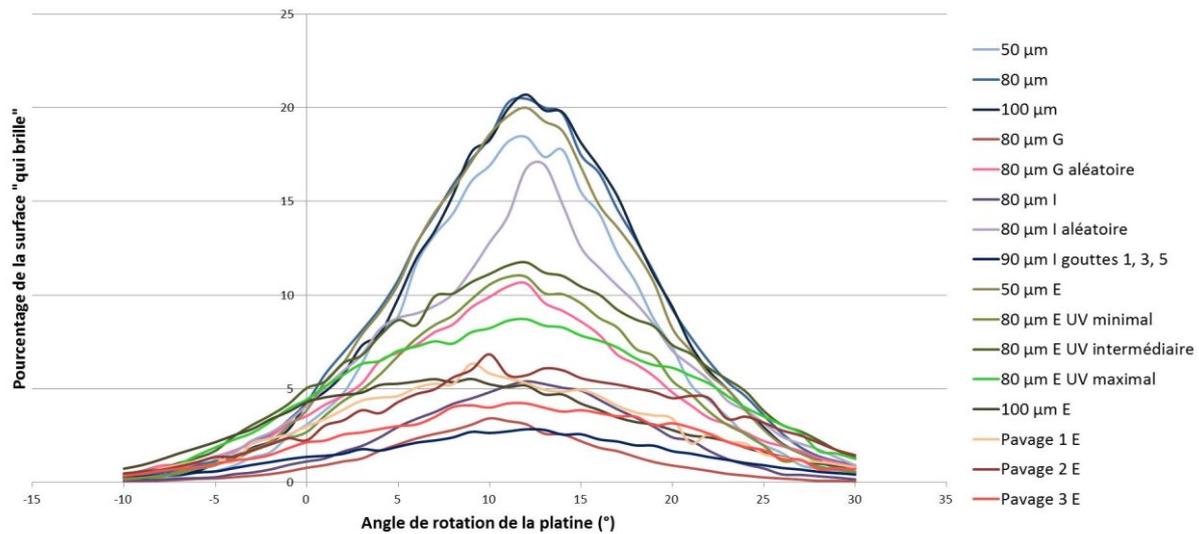


Figure B.3 31 – Courbes représentant le pourcentage de surface « blanche » en fonction de l'angle de rotation de la platine pour toutes les stratégies testées.

## 5. Conclusion

### 5.1 D'un point de vue industriel

Du point de vue de l'imprimeur, ce travail a montré qu'il était possible de créer des surfaces perçues comme mates par des observateurs en ne variant qu'un paramètre : la hauteur des couches, choisie lors de l'impression. L'étude de 12 configurations a montré que certaines étaient plus appropriées que d'autres : parce que robustes à l'impression, et modélisables, ces configurations (E, G et I) peuvent être utilisées facilement pour donner un rendu mat. Notons que E a créé des rugosités un peu faibles, et que G possède une texture très régulière qui peut gêner l'observateur. I reste la configuration la plus adaptée, et celle que nous utiliserons dans la suite.

La courbe représentée Figure B.3 32, où la fonction modélisant le brillant en fonction de la hauteur des piliers implémentée a été tracée, peut ainsi servir d'abaque. Si l'on souhaite imprimer une surface de brillant spéculaire 2 GU, la hauteur des piliers à implémenter est de 80  $\mu\text{m}$ . Du point de vue industriel, la création de surfaces mates est ainsi facilitée.

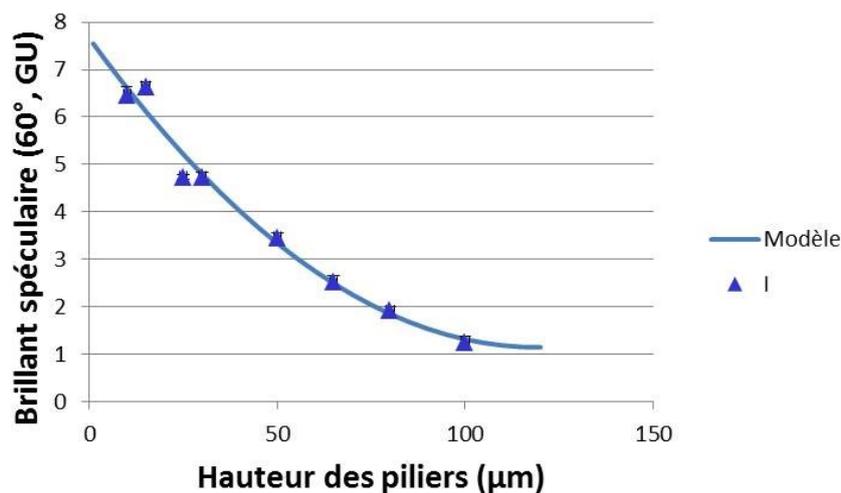


Figure B.3 32 – Points expérimentaux et courbe modèle pour la configuration I.

## 5.2 D'un point de vue métrologique

Du point de vue métrologique, nous avons vu que la mesure du brillant spéculaire, qui était la seule facilement réalisable, était pertinente : les résultats du glossmètre sont conformes à la vision des observateurs. L'expérience de perception visuelle nous alerte sur un point important : à hauteur de piliers trop élevée, le nombre et l'inclinaison des piliers créent des réflexions parasites qui troublent l'impression mate. Les abaques ont leurs limites : en créant des piliers trop hauts, on n'atteint pas notre objectif ; même si la mesure donne un résultat faible, l'œil trouve l'impression générale dérangeante. Ce n'est pas le cas pour toutes les configurations. La configuration H est à ce titre intéressante, car elle ne présente pas ce défaut de I.

## 5.3 Limites

### 5.3.1 Résolution et procédé d'impression

La première restriction est celle de la résolution de l'imprimante. Nous sommes ici limités à 450 dpi, ce qui nous a fait créer des structures à 1 pixel (56 µm) ou 2 pixels (112 µm) au mieux. Ces tailles de défauts sont larges en regard des tailles de microstructures réelles, à la surface de matériaux naturellement mats, comme le plâtre ou le pastel. Pourtant, nous avons aussi vu qu'avec notre système d'impression, les piliers de 1 pixel (à la limite de la résolution) n'étaient pas suffisamment larges pour créer assez de rugosité ! Avec le système d'impression actuelle, nous pouvons donc supposer que même si la résolution était supérieure, les performances techniques de la machine ne permettraient pas de monter suffisamment en rugosité.

Ajoutons qu'à une distance d'observation d'environ 40 cm, les plus petits détails distinguables par l'œil humain sont de 140 µm de large (la résolution angulaire de l'œil étant fixée à 0.02°). Dans la configuration d'impression actuelle, nos piliers sont donc à la limite de la résolution humaine, ce qui crée la texture visuelle dérangeante. Notons tout de même que si

les piliers avaient une forme très carrée et stricte, cette sensation de texture serait amplifiée : dans notre cas, la « mollesse » de nos piliers les rend plus flous et donc moins distinguables, tout en conservant la sensation mate.

### 5.3.2 Scintillant

L'effet scintillant des encres, dû à la fois à la présence des micro-facettes que nous avons créées et aux propriétés internes des encres, reste l'effet visuel le plus gênant. La stratégie I, qui minimise le scintillement, reste la stratégie la plus pertinente.

### 5.3.3 Couleur

Enfin, signalons que tous les tests présentés ont été imprimés avec de l'encre cyan. L'expérience, répétée avec les encres blanches et noires, a montré que les résultats étaient similaires pour toutes les encres. Le décalage observé Figure B.3 33 est dû à la mesure au glossmètre, qui est fonction de la clarté des échantillons. Créer des surfaces monochromatiques en encres de base (cyan, magenta, jaune, noir, blanc) paraît donc envisageable. Mais comment créer des surfaces mates d'autres couleurs ? Cette question fait l'objet du chapitre suivant.

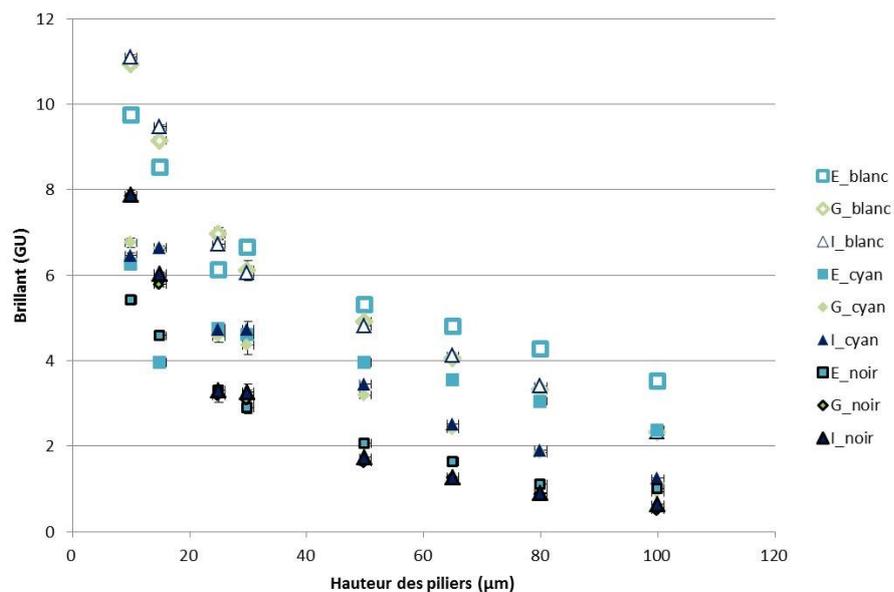


Figure B.3 33 – Brillant des imprimés, à 60°, en fonction de la hauteur demandée des piliers, pour les configurations E, G, I et pour les trois encres (cyan, blanc et noir).



## Chapitre B.4. Couleur des imprimés mats

Nous avons vu dans les parties précédentes comment réduire au maximum le brillant des imprimés 2.5D en créant une rugosité contrôlée. Cette couche rugueuse produit toutefois un effet scintillant qui s'ajoute au scintillant propre des encres ; nous avons cherché à minimiser cet effet dans le chapitre précédent. Nous sommes arrivés à la conclusion qu'un motif (« I ») convenait particulièrement à l'impression de surfaces mates. Il crée une sensation visuelle satisfaisante ; son comportement est facilement modélisable, et le scintillement provoqué reste relativement faible.

Toutefois, dans les chapitres précédents, les systèmes sur lesquels nous travaillions étaient monochromatiques : formés avec la seule encre cyan, choisie pour ses facilités d'impression et de mesure. Selon la hauteur du relief créé, la couleur était donc plus ou moins foncée. Pour envisager la reproduction d'objets réels, il nous faut donc trouver un moyen pour prendre en compte la couche couleur.

Dans ce chapitre, nous présentons la stratégie d'impression couleur retenue, puis explorons différents points : influence de la couche rugueuse sur la couleur ; influence de l'encre colorée sur la rugosité ; modélisation du système. Nous concluons en présentant les algorithmes utiles à l'uniformisation des niveaux de brillant colorés.

# 1. Métrologie de la couleur et du brillant coloré

Avant de détailler les stratégies choisies et de commenter les résultats obtenus, faisons un point sur la mesure des paramètres qui nous intéressent.

## 1.1 Mesure de la couleur

L'acquisition de la couleur est faite grâce au spectrophotomètre Ci62 de la marque Xrite™, à la géométrie d/8°. Nous reproduisons Table B.4 1 les indications de performances de l'instrument données par son certificat de calibration (établi en octobre 2017). Le calibrage couleur est effectué sur 12 céramiques colorées (la série calibrée BCRA II) et la répétabilité est calculée sur une céramique de référence blanche.

Instrument Performance Data				
Inter-Instrument Agreement (BCRA Tiles)			Repeatability (White)	
Aperture	Test Limit	Performance	Test Limit	Performance
8 m	$M \Delta E \leq 0.20$	Avg $\Delta E = 0.10$	$Max \Delta E \leq 0.05$	Max $\Delta E = 0.02$
	$Max \Delta E \leq 0.35$	Max $\Delta E = 0.18$		

Table B.4 1 – Performances du spectromètre Xrite™ Ci62 utilisé. Données de calibrage fournies par Xrite™ en octobre 2017.

L'erreur moyenne sur la mesure de la réflectance est donnée à 0.35 % R et la différence en couleur à 0.18 CIELAB  $\Delta E^*$  pour l'illuminant D65 et une observation à 10°. La reproductibilité est donnée à 0.05  $\Delta E^*$  (D65/10°). La reproductibilité étant bonne, on considérera qu'une mesure par échantillon suffit pour obtenir un résultat fiable.

## 1.2 Mesure du brillant coloré

### 1.2.1 Position du problème

La mesure du brillant se fait toujours au moyen du glossmètre KSJ MG268-F2. A la fin du chapitre B.3, nous avons noté que la mesure du brillant était influencée par la clarté des échantillons. Ce résultat est connu et est notamment expliqué par Jacques Roire en 1991 [43]. Dans cet article, l'auteur montrait que la mesure au glossmètre était nécessairement influencée par la couleur de la surface d'intérêt ; ses tests portaient sur des surfaces uniformément blanches, grises ou noires, très mates. A l'œil, ces surfaces semblent être au même niveau de brillant, mais à la mesure, la surface blanche paraît plus brillante que la surface grise, elle-même plus brillante que la surface noire. La valeur mesurée du brillant faible dépend donc de la clarté de l'échantillon. Une surface mate blanche paraîtra à la mesure toujours plus brillante qu'une surface noire de même niveau de mat.

### 1.2.2 Etalonnage du glossmètre

La différence à la mesure étant « proportionnelle au facteur de luminance lumineuse », nous avons étalonné le glossmètre sur une échelle de niveaux de gris mats afin de corriger le défaut de mesure. Jacques Roire concluait sur l'impossibilité d'utiliser un unique instrument pour caractériser tous les niveaux de brillants ; nous allons néanmoins essayer de poursuivre l'étude du mat avec notre glossmètre.

Pour produire une surface à niveaux de gris uniformément mate, nous pouvons imaginer trois méthodes :

- 1) imprimer une échelle de gris mate à piliers avec l'imprimante ;
- 2) imprimer une échelle de gris sans piliers avec l'imprimante et la recouvrir de vernis mat uniforme ;
- 3) acheter une échelle de gris mate dans le commerce (type mire photographique).

La « solution 1 » n'est pas satisfaisante car elle ne permet pas de s'affranchir du brillant propre des encres ; comme les niveaux de gris sont créés en variant le pourcentage d'encre sur la surface, la couverture d'encre augmente peu à peu, lisse les piliers et donc le brillant augmente. Il est donc difficile de séparer les phénomènes : l'influence de la couverture d'encre concurrence les piliers. La « solution 2 » est plus intéressante car on s'affranchit de l'imprimante, mais obtenir une couche vernie uniforme est difficile. On constate de plus un blanchiment du vernis qui rend la méthode caduque. Pour décorréliser les influences respectives du pourcentage d'encre et de la clarté, nous retenons la « solution 3 » et investissons dans une mire photographique de la marque XpoGrey™ (Figure B.4 1).

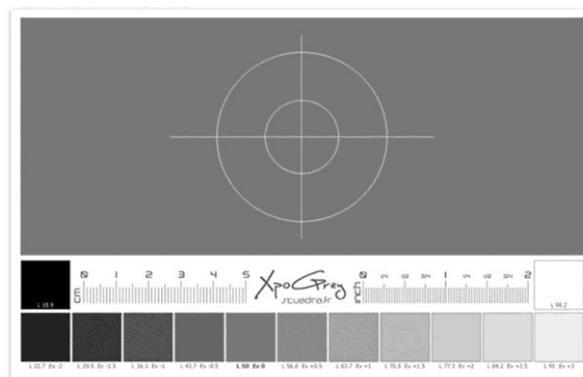


Figure B.4 1 – Mire XpoGrey™. Image : squadra.fr.

La mire présente 13 niveaux de gris, du blanc au noir, à égal niveau de brillant faible. On mesure la clarté  $L^*$  et le gloss  $g$  de chacun des niveaux de gris. La taille des patches (environ 2 cm<sup>2</sup>) facilite les mesures.

On voit Figure B.4 2 que les points mesurés sur la charte suivent une tendance nette : à clarté élevée, le gloss mesuré est fort ; à clarté faible, le gloss mesuré est très bas. Pourtant à l'œil et d'après les indications constructeur, le niveau de gloss devrait être identique et faible. On considère donc que le niveau de gloss obtenu devrait être nul ou quasi nul. C'est d'ailleurs ce qu'on obtient pour une surface de clarté faible.

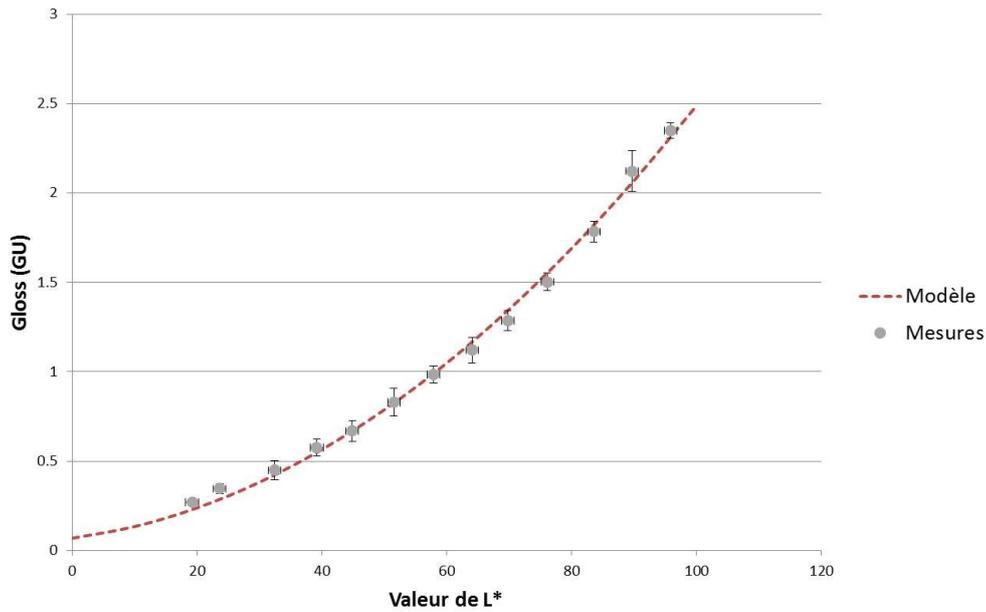


Figure B.4 2 – Courbe d’étalonnage obtenue. Les mesures effectuées sur la charte sont indiquées en gris ; la courbe modèle qui en est déduite est tracée en rouge. On affiche le gloss en fonction de la clarté.

La fonction suivante modélise la courbe de la Figure B.4 2 :

$$gloss = 2.10^{-4} \times L^{*2} + 0.005 \times L^* + 0.069 \quad (E4.1)$$

avec un coefficient de Pearson à 99.8%. On considérera dans la suite que le « zéro » du glossmètre équivaut à cette courbe, modélisée comme on vient de l’indiquer, et on corrigera chacune des mesures effectuées en fonction de sa clarté  $L^*$  pour enlever de la valeur de son gloss mesurée l’écart correspondant à la déviation du glossmètre.

Exemple de correction :

Soient trois surfaces dont les valeurs de clarté et de gloss sont données par la Table B.4 2. On sait que la valeur de gloss mesurée par le glossmètre est fautive : elle est fonction de la clarté de l’échantillon. On calcule la déviation grâce à l’équation (E4.1) et on corrige le résultat de mesure de cette déviation.

Surfaces	Gloss $g$ mesuré	Clarté $L^*$ mesurée	Déviation calculée $d = 2.10^{-4} \times L^{*2} + 0.005 \times L^* + 0.069$	Gloss corrigé $g_c = g - d$
1	6.3	91.0	2.2	4.1
2	3.2	75.8	1.6	1.6
3	2.4	61.5	1.1	1.3

Table B.4 2 – Valeurs de gloss mesurées (en GU) pour 3 surfaces exemples ; valeurs de clarté correspondantes ; déviations calculées grâce à ces clartés ; gloss corrigé résultant.

Dans cette partie, tous les résultats mats présentés sont corrigés de cette façon.

### 1.2.3 Calcul photométrique

#### 1.2.3.1 *Facteur de réflexion de l'étalon en verre*

Le glossmètre est constitué d'un plan étalon en verre d'indice  $n = 1.567$ . Eclairé sous incidence  $\theta_i = 60^\circ$ , on calcule facilement son facteur de réflexion :

$$R = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\cos\theta_i - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}} \right)^2 + \left( \frac{n^2 \cos\theta_i - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}}{n^2 \cos\theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}} \right)^2 \right] \quad (\text{E4.2})$$
$$R = 0.100057$$

Les normes indiquent que le brillant de ce plan étalon en verre vaut 100 GU à  $60^\circ$ . Un facteur de réflexion de 10 % donne donc un brillant spéculaire de 100 GU.

#### 1.2.3.2 *Brillant d'une surface lambertienne*

Considérons une surface blanche parfaitement diffusante, lambertienne d'albédo  $\rho = 1$ . Cette surface réfléchit  $\frac{\rho}{\pi}$  du flux par  $sr^{-1}$ . Le pourcentage du flux réfléchi sur l'angle solide est donné par :

$$F = \frac{\rho}{\pi} \times \Omega \quad (\text{E4.3})$$

L'ouverture angulaire du glossmètre est normalisée et vaut  $4.4^\circ \times 11.7^\circ$ . On évalue l'angle solide à :

$$\Omega = \frac{L \times l}{r^2} = \frac{(r \times \Delta\varphi \times \sin\theta) \times (r \times \Delta\theta)}{r^2} = \Delta\theta \times \Delta\varphi \times \sin\theta$$

avec  $\theta = 60^\circ$ ,  $\Delta\theta = 11.7^\circ$  et  $\Delta\varphi = 4.4^\circ$ . Il vient  $\Omega = 0.013 sr^{-1}$ . On en déduit le pourcentage de flux réfléchi :  $F = 0.00432$  ce qui donne un brillant spéculaire à  $G = F \times 100/0.10 = 4.32$  GU.

#### 1.2.3.3 *Mesure d'un échantillon blanc*

La mesure au glossmètre sur un Spectralon™ blanc donne une valeur de 2.76 GU. Sur un échantillon blanc mat imprimé à la configuration I, on trouve un brillant spéculaire à  $60^\circ$  de 2.8 GU. Faire l'hypothèse que ces deux échantillons sont lambertiens est apparemment délicate.

## 2. Couleur des imprimés mats

### 2.1 Stratégies d'impression

Nous savons à présent comment mesurer le brillant des surfaces mates colorées. Mais nous devons trouver comment imprimer ces surfaces mates colorées !

### 2.1.1 Description des stratégies

Plusieurs solutions sont envisagées pour créer une couleur mate. Nous ne retenons que celles qui permettent la création d'une couche finale en demi-ton, afin de conserver les propriétés couleurs de l'imprimante. Nous conservons les encres cyan pour nos premiers tests.

Pour permettre l'application finale d'une couche couleur demi-ton, et pour conserver la rugosité en sous-couche, différentes solutions sont possibles. Elles sont données par la Table B.4 3.

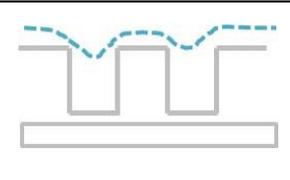
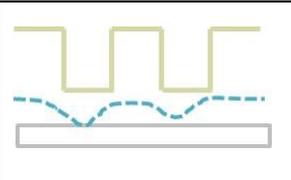
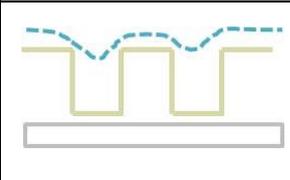
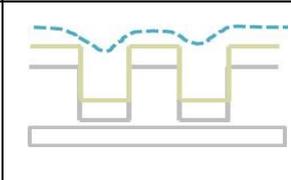
Stratégie 1	Stratégie 2	Stratégie 3	Stratégie 4
			
piliers I blancs couche cyan	couche cyan piliers I vernis	piliers I vernis couche cyan	piliers I blanc piliers I vernis couche cyan

Table B.4 3 – Stratégies d'impression couleur. Les hauteurs des piliers sont fixées à 80  $\mu\text{m}$ , sauf dans le cas 4, où la hauteur des piliers blancs est à 70  $\mu\text{m}$  et la hauteur des piliers en vernis à 10  $\mu\text{m}$ .

La stratégie 2 crée de la rugosité au-dessus de la couche couleur. Cela serait pertinent à la condition que les épaisseurs formées ne soient pas trop grandes : dans notre cas, 80  $\mu\text{m}$  de vernis impactent la couleur. Cette stratégie n'est donc pas adaptée. Dans la stratégie 3, les piliers de la sous-couche sont formés de vernis et non d'encre blanche. On espère ainsi éviter la modification de la couleur due à la présence de la sous-couche blanche. Toutefois, le vernis, très fluide, ne donne pas la rugosité escomptée sur une hauteur élevée. La stratégie 4 permet alors de monter des piliers satisfaisants, tout en séparant la couche couleur de la sous-couche blanche par une faible épaisseur de vernis. Nous nous concentrons donc sur les stratégies 1 et 4, que nous allons comparer en brillant à un imprimé monochromatique cyan, et en couleur à une couche cyan simple.

### 2.1.2 Comparaison des stratégies

Le brillant est mesuré sur chacun des patches imprimés ; la mesure est répétée cinq fois dans quatre directions, de la même manière que précédemment. Le brillant spéculaire à 60° de la couche cyan simple (couverture d'encre 100%) vaut 10.5 GU, tandis que le brillant spéculaire de la couche à piliers cyan est à 2 GU. Entre les deux, la stratégie couleur n°1 est à 3.5 GU et la stratégie n°4 à 6 GU. On voit que l'application du vernis structuré en sous-couche (même sur une faible épaisseur) n'optimise pas le rendu mat.

La mesure de la réflectance au moyen du spectrophotomètre XRite™ nous renseigne sur la couleur de nos stratégies. On voit Figure B.4 3 que la courbe de réflectance de la stratégie couleur n°4 est bien plus proche de celle du patch cyan simple que la courbe de réflectance de la stratégie n°1. Cela est confirmé par le calcul du  $\Delta E^*$  entre le patch cyan simple et les

stratégies 1 et 4. La stratégie 4, qui est formée d'un léger empilement de vernis sous la couche couleur, a un  $\Delta E^*$  faible (5.7). La stratégie 1 fait état d'un  $\Delta E^*$  bien plus élevé.

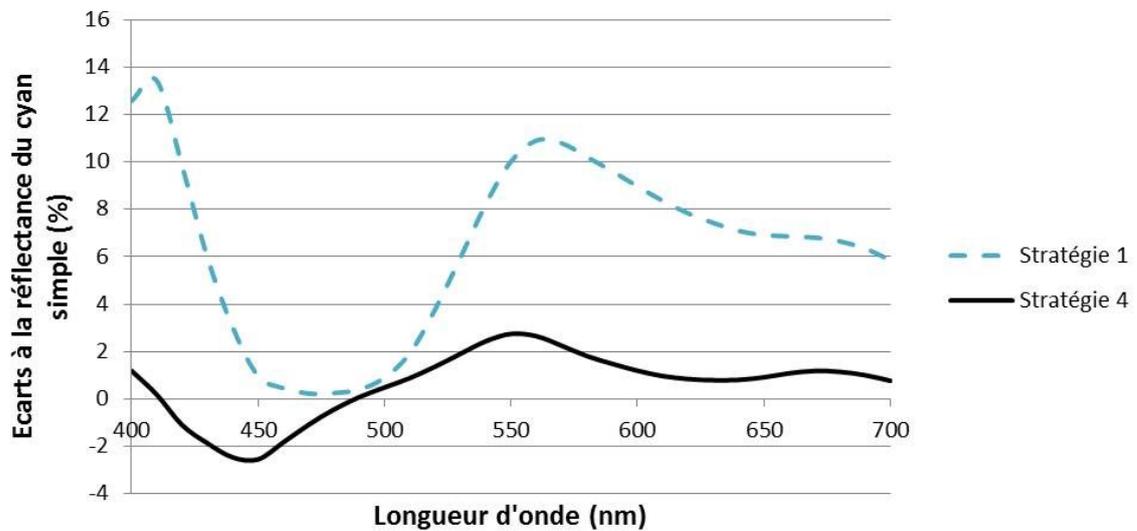


Figure B.4 3 – Ecarts à la réflectance calculés entre la stratégie 1 et le cyan simple (courbe bleue) et entre la stratégie 4 et le cyan simple (courbe noire).

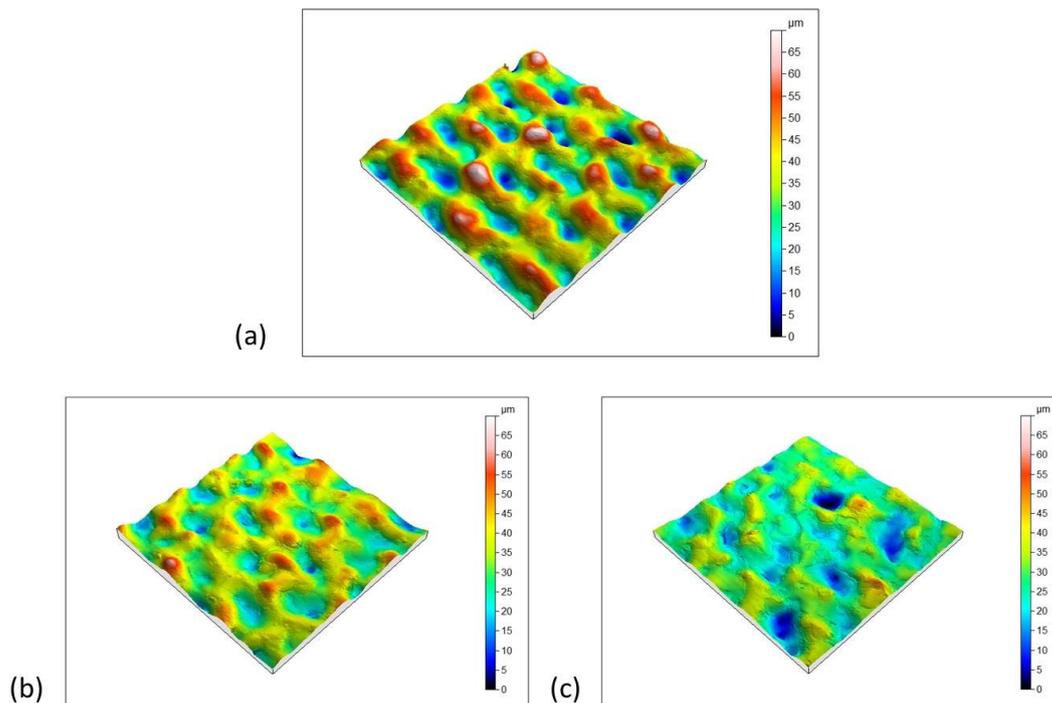


Figure B.4 4 – Topographies réelles, d'un millimètre de côté, mises à la même échelle en Z (70  $\mu\text{m}$  maximum). (a) Echantillons à piliers I cyan monochromatique. (b) Echantillon imprimé selon la stratégie 1, et (c) échantillon imprimé selon la stratégie 4.

Enfin, la mesure de rugosité nous donne une dernière information : la stratégie n°4, qui contient une sous-couche en vernis, possède une rugosité faible, insuffisante pour obtenir un aspect de surface mat. Les topographies données Figure B.4 4 font état d'une couche très

rugueuse et régulière en encre cyan, légèrement écrasée pour la stratégie n°1 (la couche finale couleur a comblé une partie des vallées), et très molle pour la stratégie n°4.

Les résultats sont regroupés Table B.4 4. La stratégie n°4, en interposant une fine couche de vernis sous la couche couleur, donne un rendu colorimétrique intéressant, mais sa rugosité est insuffisante pour « faire du mat ». La stratégie n°1, plus pertinente du point de vue topographique, est donc notre choix pour la suite : nous faisons primer l’aspect mat sur l’aspect colorimétrique.

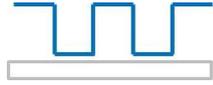
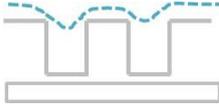
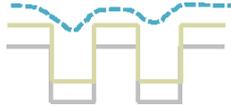
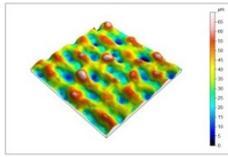
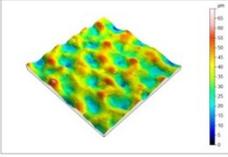
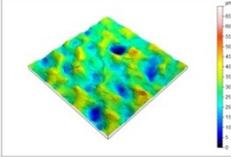
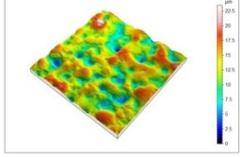
Stratégie	 Piliers I cyan	 Stratégie 1	 Stratégie 4	 Cyan simple
Brillant (60°)	2	3.5	6	10.5
$\Delta E^*$	<i>non calculé</i>	16.7	5.7	0
Rugosité				
$S_q$ (µm)	11.8	8.3	6.9	3.1
$S_z$ (µm)	68.0	62.3	52.1	23.5

Table B.4 4 – Comparaison des stratégies 1 et 4 avec une couche à piliers monochromatique cyan et une couche cyan simple.

### 2.1.3 Un mot sur le scintillant

Les échantillons « cyan à piliers I », « cyan sur piliers blancs I » (stratégie 1) et « cyan simple » ont été présentés aux 25 observateurs que nous avons mis à contribution dans le chapitre B.3. Le paradigme était toujours :

« Pouvez-vous classer ces échantillons sur une échelle allant du plus mat au plus brillant ? »

Les observateurs ont dû trier ces trois échantillons sous éclairage diffus (tubes fluorescents du bureau des thésards) et sous éclairage directionnel (LED de smartphone). Les Table B.4 5 et Table B.4 6 donnent les résultats. Les observateurs établissent le classement suivant : l’échantillon à piliers I cyan paraît moins brillant que la stratégie 1, elle-même moins brillante que l’échantillon cyan simple. Les écarts-types ne sont pas très élevés : le classement se fait facilement. Sous éclairage diffus, l’échantillon à piliers cyan paraît toujours le plus mat, même si sa couleur sombre peut avoir influencée légèrement les observateurs. Le cyan simple, apposé sans piliers, paraît bien plus brillant que celui apposé sur piliers, ce qui justifie nos

efforts. Sous éclairage directionnel, l'effet scintillant des encres est très visibles : il est toutefois minimisé sur l'imprimé à piliers cyan.

Stratégie	Brillant mesuré au glossmètre (60°, GU)	Moyenne reçue au test psycho-visuel sous éclairage diffus	Ecart-type
Piliers I cyan	2	0.04	0.20
Stratégie 1	3.5	0.96	0.20
Cyan simple	10.5	2.00	0.00

Table B.4 5 – Résultats du test psycho-visuel sous éclairage diffus.

Stratégie	Brillant mesuré au glossmètre (60°, GU)	Moyenne reçue au test psycho-visuel sous éclairage directionnel	Ecart-type
Piliers I cyan	2	0.12	0.33
Stratégie 1	3.5	1.00	0.50
Cyan simple	10.5	1.88	0.33

Table B.4 6 – Résultats du test psycho-visuel sous éclairage directionnel.

La stratégie 1 se place en position intermédiaire. Elle n'apparaît pas aussi mate que l'imprimé composé uniquement de cyan, mais elle reste plus mate et moins scintillante à l'œil qu'une couche cyan simple.

## 2.2 Position du problème

### 2.2.1 Moduler la sous-couche blanche pour créer le rendu mat

La stratégie retenue pour créer de la couleur mate prévoit de créer une sous-couche en encre blanche selon la configuration I retenue dans le chapitre B.3, périodique, et de la recouvrir par une couche colorée. En jouant sur la hauteur des piliers de la sous-couche, exactement comme au chapitre B.3, on espère modifier la rugosité et donc diminuer le brillant. Mais à la différence du chapitre B.3, les piliers sont ici recouverts d'une couche (uniforme ou pas) de couleur...qui va nécessairement modifier la rugosité !

Un test rapide nous confirme que les abaques établis au chapitre B.3 sont toujours valides. Les piliers sont imprimés en encre blanche aux hauteurs 15 µm, 25 µm, 30 µm, 50 µm, 65 µm, 80 µm et 100 µm, puis recouverts de la même couche d'encre cyan. Le brillant est un peu plus élevé (nous sommes dans une configuration un peu différente, et la rugosité est moins élevée que dans le cas des empilements monochromatiques), mais l'allure de la courbe est similaire. On observe Figure B.4 5 une décroissance nette du brillant spéculaire à 60° avec la hauteur des piliers de la sous-couche.

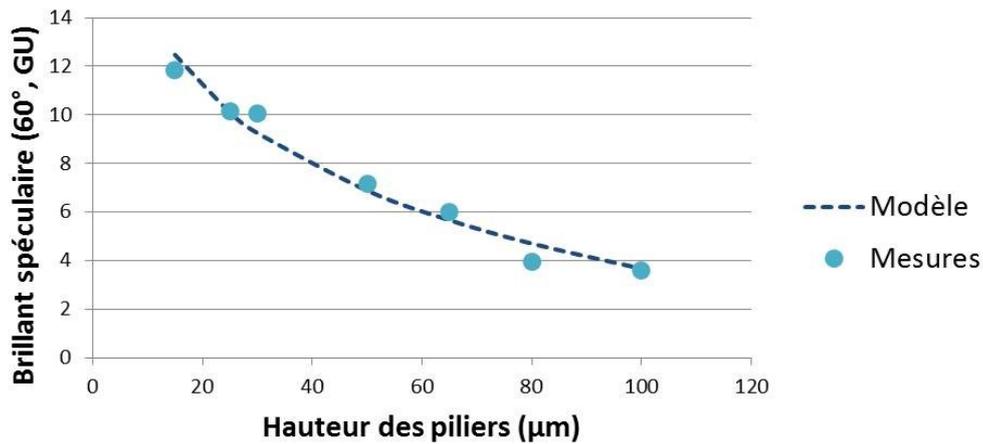


Figure B.4 5 – Brillant spéculaire à 60° en fonction de la hauteur des piliers de la sous-couche blanche.

La courbe de la Figure B.4 5 est décrite par l'équation (E4.4) :

$$gloss (60^\circ) = -4.6417 \times \ln(h) + 25.0462 \quad (E4.4)$$

qui satisfait aux points mesurés avec un coefficient de Pearson à 98.6%. Notre travail reste pertinent : moduler la sous-couche en fonction de la hauteur des piliers permet bien, malgré l'ajout d'une couche couleur en fin d'impression, de diminuer lentement le brillant spéculaire à 60°.

### 2.2.2 Problèmes liés à la couche couleur

Toutefois, on s'aperçoit rapidement de deux effets de la couche couleur sur le brillant spéculaire perçu. Dans un premier temps, selon le pourcentage d'encre déposée, la rugosité de la sous-couche blanche va être plus ou moins modifiée ; le brillant sera donc impacté. Dans un second temps, le procédé de demi-ton (*halftone*) utilisé pour créer les couleurs et qui place les gouttes d'encres primaires Cyan, Magenta, Jaune à certains endroits pour créer la sensation colorée va être impacté par la présence d'une sous-couche rugueuse.

La Figure B.4 6 montre une couche d'encre colorée déposée sur des piliers blancs. On notera que l'encre magenta a un comportement chaotique, causé par un défaut d'alignement des têtes connu sur l'imprimante prototype que nous utilisons. La Figure B.4 7 donne des exemples de répartition des gouttes d'encre colorée, à différents niveaux de couverture. On comprend que plus le taux de couverture augmente, et plus les piliers vont être bouchés par l'encre colorée : le brillant risque donc de diminuer en conséquence.

Plusieurs questions se posent alors :

- Quelle est l'influence de la couche couleur sur la rugosité et donc sur le mat ?
- Peut-on modéliser le niveau de matité des surfaces colorées ?

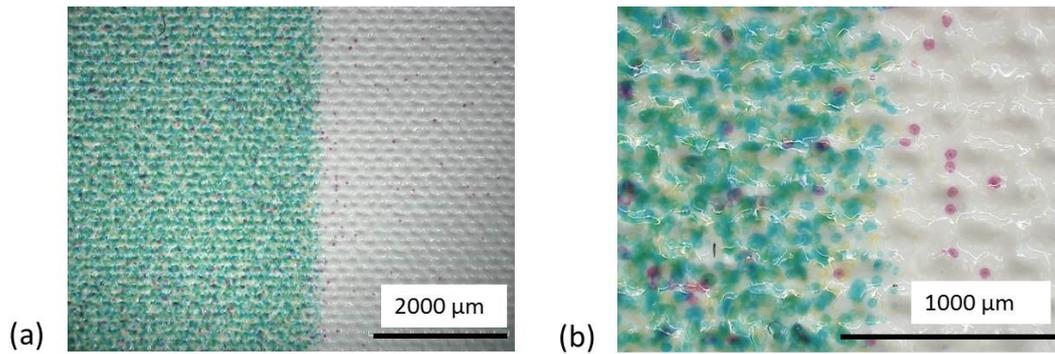


Figure B.4 6 – Couche couleur et couche rugueuse, à deux grossissements (a) et (b). La couche couleur est formée à 50% d'encre cyan, à 25% d'encre magenta et à 25% d'encre jaune.

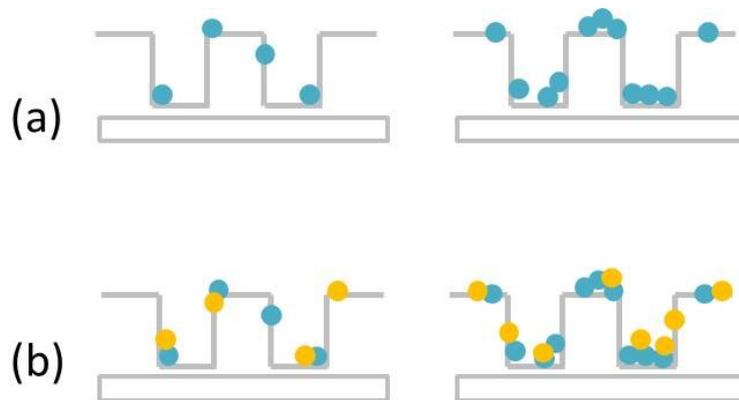


Figure B.4 7 – Exemple de dépôt des gouttes, (a) cas à une encre et (b) cas à deux encres. Selon le pourcentage d'encre déposée, la rugosité est plus ou moins modifiée. Plus la rugosité baisse, et plus le brillant spéculaire augmente.

### 2.2.3 Cas d'étude : nuancier coloré

Nous choisissons la Colorchecker d'XRite™ comme nuancier test (Figure B.4 8). Cette charte est composée de 24 patches colorés. Nous avons imprimé cette charte 6 fois : la première fois, sur une sous-couche blanche lisse, puis sur 5 sous-couches à piliers, de hauteur 25 μm, 50 μm, 65 μm, 80 μm puis 100 μm.

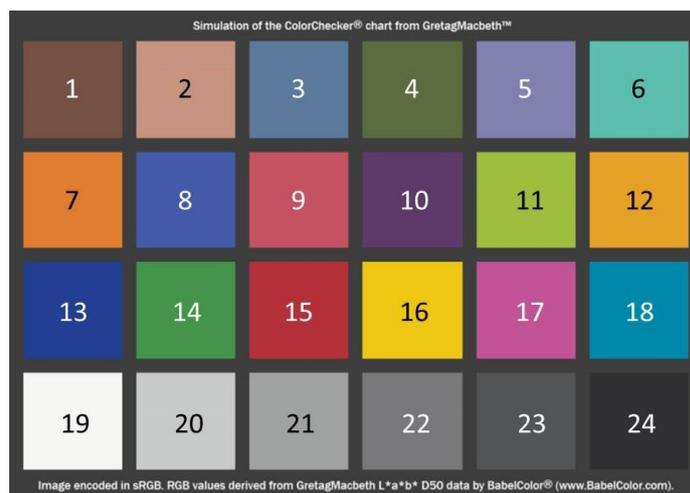


Figure B.4 8 – Nuancier, imprimé 6 fois : sur une sous-couche blanche plane, puis sur 5 sous-couches blanches à piliers à 25  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 65  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$  et 100  $\mu\text{m}$  de hauteur.

### 2.2.3.1 Brillant des chartes

Nous mesurons tout d’abord le brillant spéculaire à 60° des patches des chartes imprimées. Toutes les mesures sont corrigées en fonction de la clarté  $L^*$  des échantillons. Les résultats sont présentés Figure B.4 9.

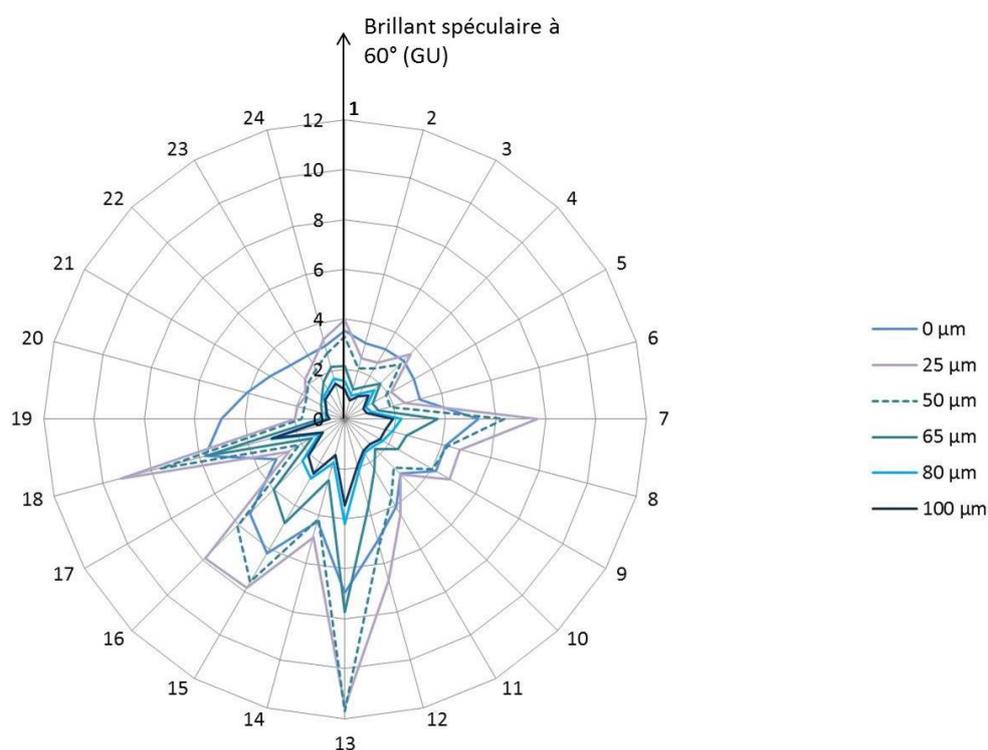


Figure B.4 9 – Brillant spéculaire à 60° (en Gloss Units) des 24 patches du nuancier, pour 6 hauteurs de piliers.

On voit nettement Figure B.4 9 que tous les mélanges colorés n’ont pas le même brillant spéculaire. La courbe qui représente le brillant des patches sans piliers est loin d’être circulaire. Les patches 7 (orange), 13 (bleu), 15 (rouge) ou encore 18 (cyan) se démarquent de

leurs voisins par un niveau de brillant plus élevé. On voit qu'en fonction des mélanges d'encre, de la fluidité propre à chaque encre primaire et aux propriétés spatiales du demi-ton, le brillant va varier. Lorsqu'on insère des piliers dans la sous-couche, le premier effet est variable selon les encres. Pour les couleurs déjà citées, moduler la sous-couche à 25 ou 50  $\mu\text{m}$  provoque l'augmentation du niveau de brillant spéculaire ; il faut dépasser les 65  $\mu\text{m}$  pour que le brillant diminue. Pour ces couleurs en demi-ton, la rugosité de la sous-couche doit être très élevée pour compenser l'effet visqueux ou lissant des mélanges colorés.

Pour les hauteurs de piliers intéressantes – qui créent du mat – l'écart entre les patches persiste. Certains mélanges d'encre brillent plus que les autres. Certains comportent une majorité d'encre cyan, d'autre une majorité d'encre magenta. On ne peut pas aller plus loin pour le moment.

### 2.2.3.2 Couleur des chartes

Nous avons fait l'acquisition des paramètres  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  des patches de chacune des chartes. Ces données nous permettent de calculer le  $\Delta E^*$ , qui évalue la différence de couleur entre deux échantillons. Nous travaillons simplement avec le  $\Delta E^*$  1976, tel que :

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (\text{E4.5})$$

avec  $L_1^*$ ,  $a_1^*$  et  $b_1^*$  les coordonnées d'un premier patch coloré et  $L_2^*$ ,  $a_2^*$  et  $b_2^*$  celle d'un second patch coloré. Nous comparons pour chacun des patches la couleur avec sous-couche mate avec la couleur sans sous-couche. Les  $\Delta E^*$  s'écrivent alors, pour une hauteur de piliers considérée  $h$  (en  $\mu\text{m}$ ) :

$$\Delta E_{\text{couleur},h}^* = \sqrt{\left(L_{\text{couleur},0\mu\text{m}}^* - L_{\text{couleur},h}^*\right)^2 + \left(a_{\text{couleur},0\mu\text{m}}^* - a_{\text{couleur},h}^*\right)^2 + \left(b_{\text{couleur},0\mu\text{m}}^* - b_{\text{couleur},h}^*\right)^2} \quad (\text{E4.6})$$

L'ensemble des  $\Delta E^*$  calculés est représenté Figure B.4 10. Les résultats sont inégaux, mais rares sont les  $\Delta E^*$  inférieurs à 2.2. On remarque les  $\Delta E^*$  particulièrement élevés pour certains patches à 100  $\mu\text{m}$ .

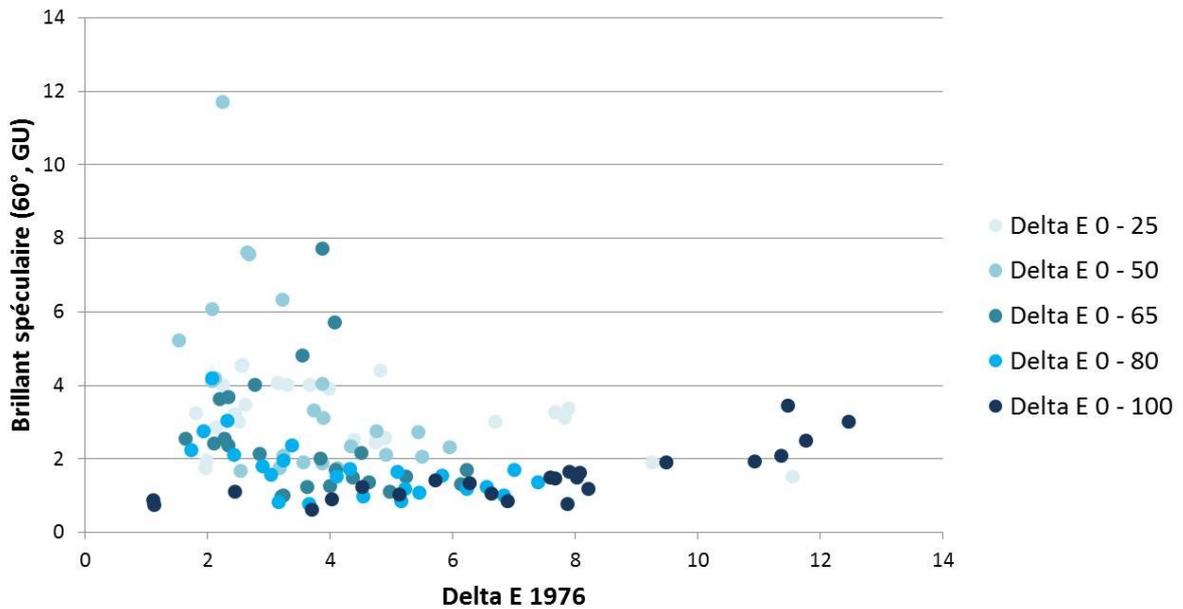


Figure B.4 10 –  $\Delta E^*$  des 24 patches du nuancier, calculés entre la charte à 0  $\mu\text{m}$  et chacune des chartes à piliers (25  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 65  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$  et 100  $\mu\text{m}$ ).

Afin de mieux visualiser les écarts en couleur en fonction de la hauteur de la sous-couche, nous avons sélectionné les patches Rouge, Vert, Bleu et Cyan, Magenta, Jaune. Les résultats sont tracés Figure B.4 11 et Figure B.4 12.

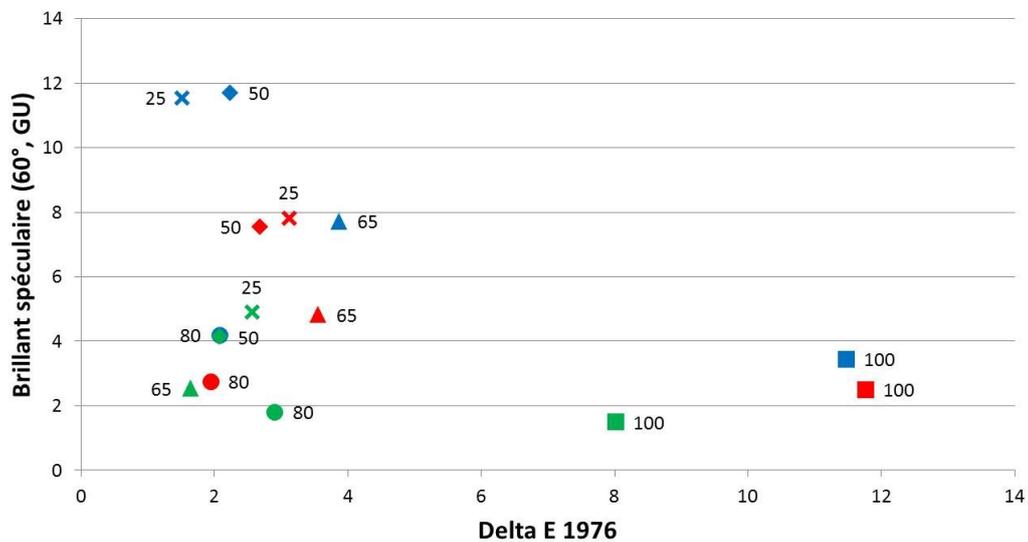


Figure B.4 11 –  $\Delta E^*$  des patches 13, 14 et 15 du nuancier, respectivement bleu, vert et rouge, calculés entre la charte à 0  $\mu\text{m}$  et chacune des chartes à piliers (25  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 65  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$  et 100  $\mu\text{m}$ ).

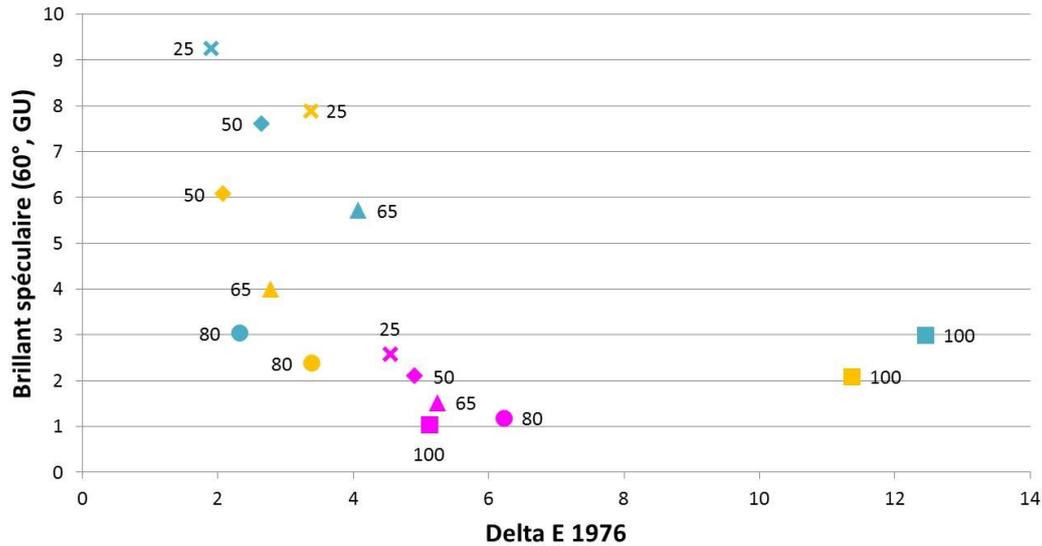


Figure B.4 12 –  $\Delta E^*$  des patches 16, 17 et 18 du nuancier, respectivement jaune, magenta et cyan, calculés entre la charte à 0  $\mu\text{m}$  et chacune des chartes à piliers (25  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 65  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$  et 100  $\mu\text{m}$ ).

Les patches Bleu et Cyan présentent le même comportement : à petits piliers, l'écart en couleur entre la couleur simple et la couleur avec sous-couche est relativement faible. Quand la hauteur des piliers augmente, l'écart augmente, avec un décrochement notable à 80  $\mu\text{m}$ , hauteur pour laquelle l'écart colorimétrique  $\Delta E^*$  est étonnamment réduit. Ce sont d'ailleurs les valeurs  $a^*$  et  $b^*$  qui varient : la clarté  $L^*$  reste relativement constante jusqu'à un certain point, malgré les variations en hauteur de la sous-couche blanche, avant d'augmenter nettement quand la rugosité de la sous-couche est suffisante.

Pour les patches Vert et Jaune, le  $\Delta E^*$  augmente régulièrement avec la hauteur des piliers de la sous-couche. Les patches Magenta présentent quant à eux des  $\Delta E^*$  beaucoup plus resserrés : l'influence de la sous-couche blanche est beaucoup moins sensible. On retrouve le comportement chaotique de l'encre magenta, très fluide.

De manière générale, on peut faire deux groupes : les patches aux piliers de hauteur 100  $\mu\text{m}$ , et les autres. Tant que les piliers n'ont pas atteints cette hauteur de 100  $\mu\text{m}$ , l'écart en couleur reste modéré. A 100  $\mu\text{m}$ , les trois valeurs  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  des patches changent nettement : clarté et chroma sont modifiées. Plus les piliers sont hauts, et plus des jeux d'ombrage se créent ; en même temps, l'encre colorée peine plus à se répartir sur la surface.

### 2.2.3.3 Couleur et rugosité

En regardant précisément l'évolution des valeurs  $L^*$ ,  $a^*$  et  $b^*$  pour deux couleurs (jaune et cyan), nous pouvons préciser nos résultats.

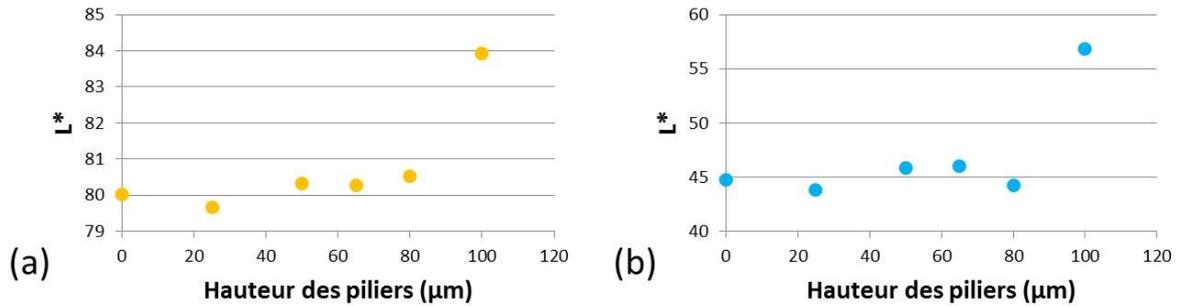


Figure B.4 13 – Evolution de la clarté  $L^*$  en fonction de la hauteur des piliers de la sous-couche blanche pour (a) les patches jaunes et (b) les patches cyan.

La Figure B.4 13 indique que plus la hauteur de la sous-couche augmente, c'est-à-dire plus la rugosité augmente, et plus la clarté augmente. Cela est d'autant plus vrai que la surface initiale est sombre : l'évolution de la valeur  $L^*$  dans le cas du cyan est plus importante que dans le cas du jaune.

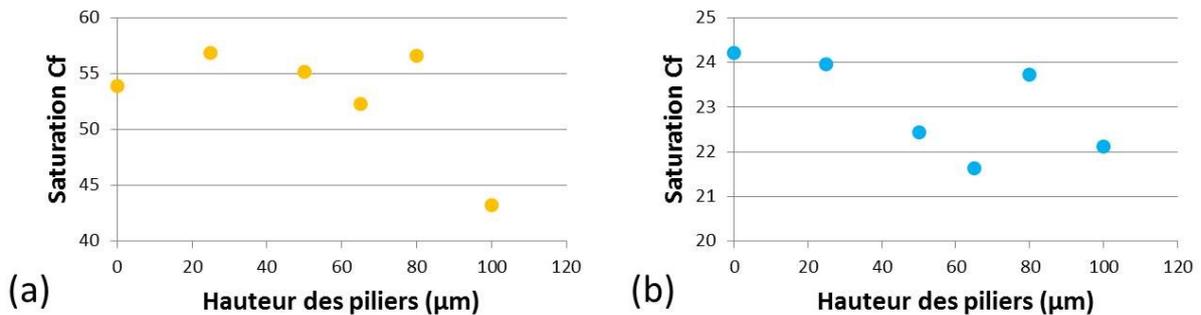


Figure B.4 14 – Evolution de la saturation  $C_f = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$  en fonction de la hauteur des piliers de la sous-couche blanche pour (a) les patches jaunes et (b) les patches cyan.

La saturation  $C_f = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$  en fonction de la hauteur des piliers de la sous-couche est tracée Figure B.4 14. Plus la rugosité de la surface augmente, et plus la saturation diminue ; ce qui paraît d'autant plus vrai que la surface initiale est claire.

Ces deux résultats sur la clarté et la saturation correspondent à ceux établis en simulation par Simonot *et al.* en 2003 que nous avons cités au chapitre A.2 [78].

#### 2.2.4 Uniformiser les niveaux de brillant ?

L'exemple de la Colorchecker montre que toutes les encres ne donnent pas le même brillant spéculaire à 60°, à sous-couche à piliers égale. L'uniformisation des niveaux de brillant représente un défi intéressant : que dire d'un objet supposé mat qui présenterait des reflets gênants sur certaines couleurs seulement ? La question de la couleur en elle-même (comment reproduire « la bonne couleur » ?) sort de notre étude : nous ne pourrions nous y intéresser vraiment. Nous nous concentrons donc sur les aspects mats et leur uniformisation en fonction de leur couleur.

Pour cela, nous souhaitons modéliser le brillant spéculaire à 60° des mélanges d'encre. Nous travaillerons sur des mélanges d'encre de composition connue, dont le brillant et la couleur seront mesurés. L'analyse de ces données pourrait nous permettre de construire un espace dans lequel nous prédirions, pour tous les mélanges colorés, le niveau de brillant spéculaire à hauteur de piliers donnée : nous pourrions ainsi compenser les écarts en brillant liés à la couleur par l'ajout d'une rugosité.

### 3. Modélisation des niveaux de brillant des mélanges colorés

Suite à l'étude développée en début de chapitre, nous choisissons la stratégie 1 pour créer une couleur mate (couche couleur demi-ton sur des piliers blancs de hauteur choisie). La variable qui nous permet de gérer le niveau de matité est la hauteur des piliers de la sous-couche blanche. La question qui nous intéresse ici est la suivante : peut-on modéliser le niveau de brillant de l'imprimé résultant, en fonction de sa couleur ? Pour cela, nous avons considéré encre par encre les aspects de surface des imprimés, pour différentes hauteurs de piliers.

#### 3.1 Comprendre la couleur en impression

Avant de présenter nos résultats, nous souhaitons préciser comment la couleur est gérée en impression. La grande majorité des systèmes d'impression sont quadrichromiques : ils possèdent 4 canaux, constitués par les 4 encres primaires de l'espace colorimétrique soustractif CMJN – **Cyan, Magenta, Jaune** et **Noir** (voir Figure B.4 15). Les couleurs sont déposées par gouttes, sous forme de points, et alignées suivant une **trame** pour former une couleur. L'effet de la trame est indiscernable à l'œil, il faut un microscope pour la distinguer. Selon les couleurs primaires utilisées et les trames, de nombreuses couleurs peuvent être réalisées. Les algorithmes de **demi-ton** (*halftone*) gèrent la répartition des points sur les trames, pour faire varier l'intensité des couleurs produites.

Les fichiers à imprimer peuvent être créés directement en CMJN (chaque canal d'un fichier .tif correspondant à une primaire), ou être des fichiers couleurs RGB convertis en CMJN au moyen d'un profil colorimétrique. Le **profil ICC** qui décrit la restitution des couleurs par l'imprimante est utilisé pour la conversion d'une couleur  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  vers une couleur CMJN [118, 119].

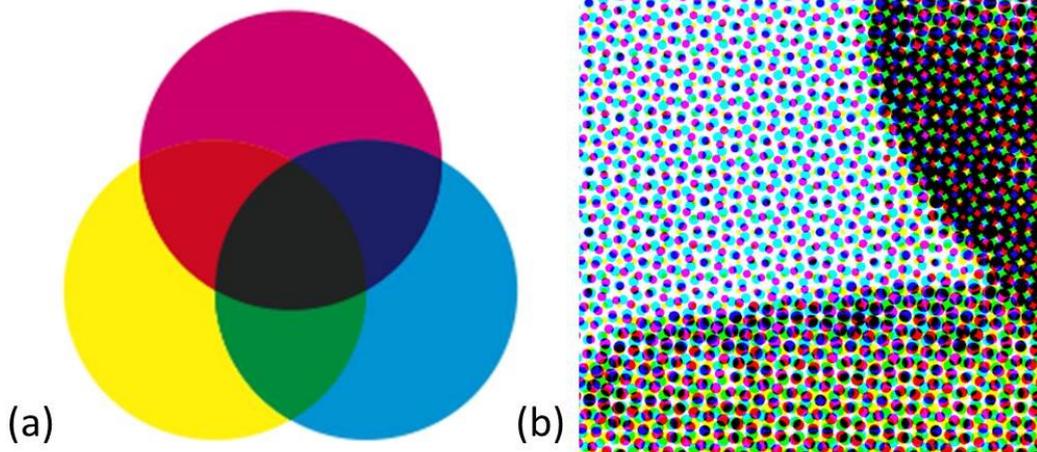


Figure B.4 15 – Procédé couleur utilisé en impression. (a) Le système soustractif CMJN. (b) Zoom sur un exemple de trame utilisée pour reproduire certaines couleurs. Images : wikipedia.fr.

Le **gamut** de l'imprimante représente l'ensemble des couleurs reproductibles (voir Figure B.4 16). C'est un espace de couleurs accessibles par un appareil. Le gamut sert de comparaison entre outils d'impression ou protocoles.

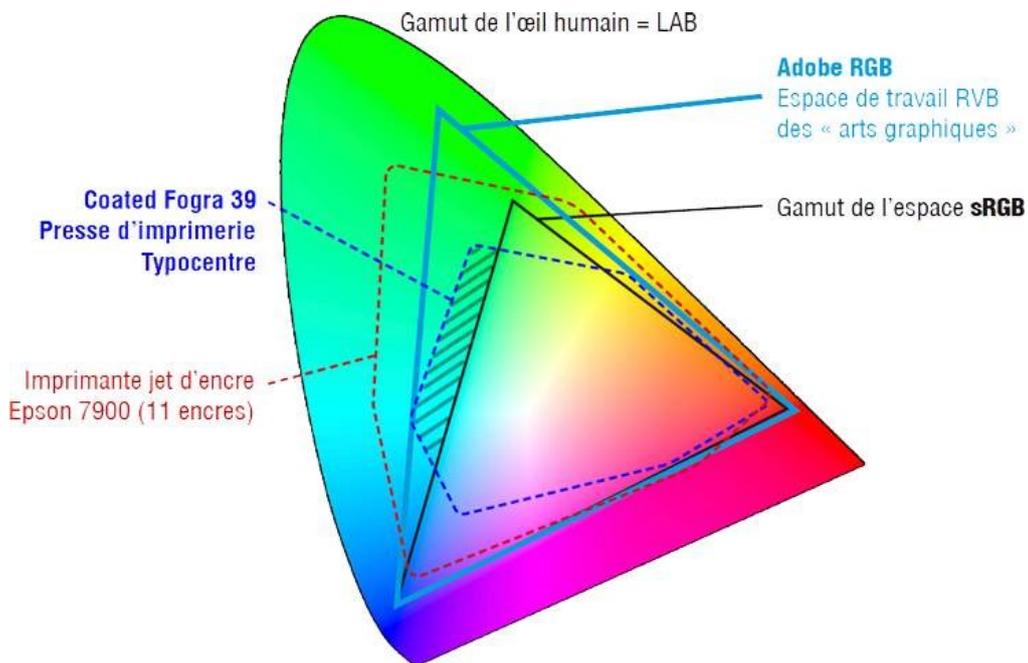


Figure B.4 16 – Exemple de gamuts représentés dans le diagramme de chromaticité  $xy$ . L'œil humain voit plus de couleurs que ce qu'une imprimante est capable de produire. Image : typocentre.fr.

Nous utiliserons ces outils de la **gestion des couleurs** (*Color Management*) dans la suite de notre travail.

### 3.2 Protocole

Nous choisissons de créer directement les fichiers en CMJN sur Matlab™ afin d'éviter le cheminement via le profil ICC implémenté sur l'imprimante. Par conséquent, tous nos fichiers couleurs seront implémentés sur Matlab en .tif, de telle façon que le canal 1 corresponde au pourcentage d'encre cyan, le canal 2 à l'encre magenta, le canal 3 à l'encre jaune et le canal 4 à l'encre noire. Les fichiers couleurs sont ensuite superposés aux sous-couches blanches. Nous fixons la hauteur des piliers de la sous-couche blanche à 80 μm, hauteur qui a montré créer une sensation mate et rester confortable pour un observateur. La

Figure B.4 17 présente les 4 expériences mises en place.

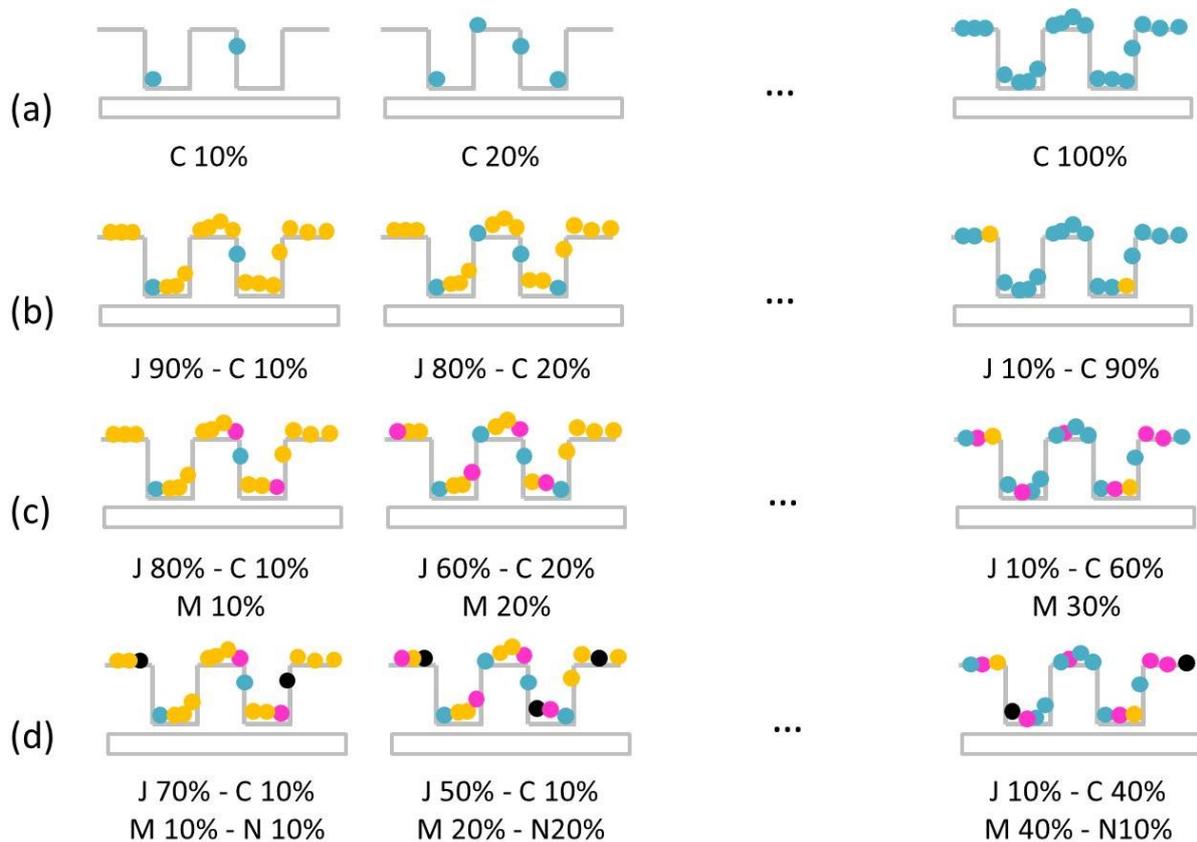


Figure B.4 17 – Protocoles mis en place pour l'étude de l'influence de la couleur sur les aspects mats. La hauteur des piliers de la sous-couche est fixée à 80 μm. (a) La couverture d'encre varie. (b), (c) et (d) La couverture d'encre est fixée à 100%, et les pourcentages relatifs en encres primaires varient.

Expérience (a) : Les couleurs sont formées d'une seule encre. Le taux de couverture en encre varie, de 10 à 100% par pas de 10%. Au taux de couverture de 10%, la couleur paraît claire ; à 100%, la couleur est saturée. 10 patches sont donc imprimés pour chacune des 4 couleurs primaires (la Figure B.4 18 donne la charte CMJN utilisée). Ces couleurs sont imprimées sur des piliers blancs et sur des sous-couches lisses. Sont donc imprimés 10 patches par primaire, sur deux types de support, ce qui nous donne 80 patches à analyser (40

sur piliers, 40 sur support lisse). Les paramètres  $L^*a^*b^*$  ainsi que le brillant spéculaire à 60° sont mesurés ; l'acquisition du brillant se fait par moyenne sur 5 mesures, dans 4 directions, comme indiqué plus haut.

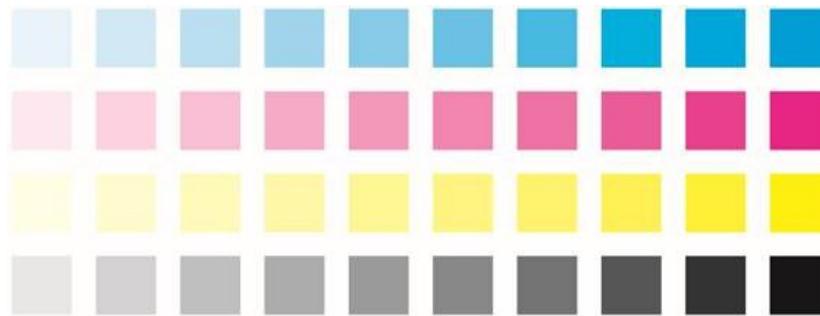


Figure B.4 18 – Charte CMJN utilisée. Les pourcentages d'encre varient de 10 à 100%.

**Expérience (b) : Mélanges à deux encres.** La couverture en encre ne varie plus, elle est fixée à 100%. Deux couleurs primaires sont mélangées peu à peu ; on fait varier leurs pourcentages relatifs. On regarde successivement les mélanges Cyan – Jaune, Cyan – Magenta, Magenta – Jaune, Noir – Cyan, Noir – Magenta et Noir – Jaune. La Figure B.4 19 présente les patches colorés utilisés dans les cas Cyan – Jaune, Cyan – Magenta et Magenta – Jaune.



Figure B.4 19 – Chartes utilisées pour l'étude des mélanges à deux encres. La couverture en encre est fixe à 100% ; ce sont les pourcentages respectifs d'encres colorées qui varient.

Pour maintenir une couverture totale à 100%, ce sont les pourcentages relatifs en encre colorée qui varient par pas de 10%. Ainsi pour le mélange Cyan – Jaune : Cyan à 100%, puis Cyan à 90 % et Jaune à 10%, puis Cyan à 80 % et Jaune à 20%, jusqu'au Jaune à 100%. Les pourcentages sont indiqués Figure B.4 19.

Ces chartes sont imprimées sur support à piliers blancs de hauteur 80 µm et sur support lisse, mais seuls les résultats des supports à piliers ont été exploités, ce qui représente 58 patches à analyser (brillant et couleur, mesuré de la même manière que précédemment).

**Expérience (c) : Mélanges à trois encres.** La couverture en encre est toujours fixée à 100%. Trois primaires sont mélangées ; leurs pourcentages varient peu à peu. On regarde successivement les mélanges Cyan – Jaune – Magenta, Cyan – Jaune – Noir, Cyan – Magenta – Noir et Magenta – Jaune – Noir. La Figure B.4 20 présente 30 patches colorés parmi ceux utilisés dans les cas Cyan – Jaune, Cyan – Magenta et Magenta – Jaune.

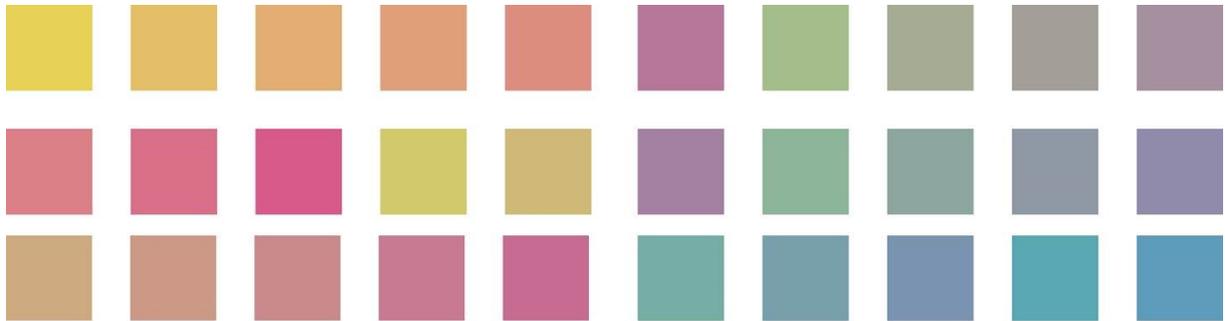


Figure B.4 20 – 30 patches colorés utilisés pour l'étude des mélanges à deux encres. La couverture en encre est fixe à 100% ; ce sont les pourcentages respectifs d'encres colorées qui varient. Ici sur les patches de gauche, le pourcentage en encre cyan est faible (10 %), il augmente peu à peu sur les patches de droite.

Pour maintenir une couverture totale à 100%, ce sont à nouveau les pourcentages relatifs en encre colorée qui varient par pas de 10%. Ainsi pour le mélange Cyan – Jaune – Magenta : Cyan à 80 %, Jaune à 10%, Magenta à 10%, puis Cyan à 70 %, Jaune à 20%, Magenta à 10%, etc, ce qui représente 144 patches au total, imprimés sur un support à piliers blancs à la hauteur de 80 µm. Pour le calcul du modèle, il faut ajouter à ces nouveaux patches les imprimés de l'expérience (b).

**Suite : Mélanges à quatre encres.** La couverture en encre est toujours fixée à 100%, et les taux de couverture en encre des quatre primaires varient peu à peu pour construire un espace à 5 dimensions (CMJN et le brillant spéculaire à 60°). Idéalement, il faudrait compléter le modèle en imprimant de nouveaux patches à 4 encres, ce qui représenterait plusieurs dizaines de nouveaux patches à imprimer et analyser. Nous choisissons plutôt de créer un modèle à 5 dimensions en utilisant les résultats des expériences (b) et (c). Ce modèle se complètera aisément avec des points à quatre encres imprimés ultérieurement.

La Table B.4 7 récapitule le nombre de patches à imprimer sur piliers blancs et analyser. Il faut leur ajouter les 40 patches de l'expérience (a) imprimés sur support blanc lisse. Nous avons donc  $242 + 40 = 282$  patches colorés à imprimer, sur lesquels nous allons mesurer le brillant (5 mesures dans 4 directions) et la couleur (une mesure par patch). Cela représente donc 282 mesures colorimétriques et 5640 mesures de gloss à effectuer. Ces mesures sont rapides et restent donc envisageables.

(a)	(b)	(c)
40	58	144

Table B.4 7 – Nombres de patches imprimés sur des piliers blancs de hauteur 80 µm à analyser en brillant et en couleur.

### 3.3 Influence de la couverture d'encre sur le niveau de brillant

Ce paragraphe présente les résultats de l'expérience (a). La Figure B.4 21 présente des prises de vue réalisées au microscope de surfaces cyan sur piliers. La répartition des gouttes d'encre sur les piliers est nettement visible. Celles-ci bouchent les creux, ou viennent se placer sur les piliers, modifiant ainsi la rugosité de surface.

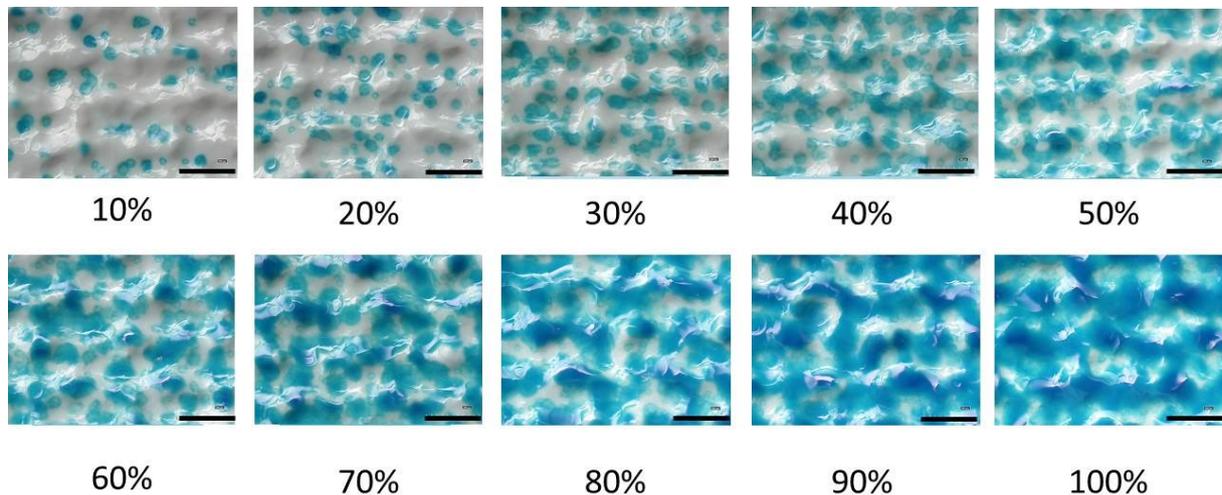


Figure B.4 21 – Charte cyan sur sous-couche blanche à piliers (80  $\mu\text{m}$ ) vue au microscope. La barre d'échelle correspond à 200  $\mu\text{m}$ . Les piliers sont nettement visibles sous le microscope.

La Figure B.4 22 illustre le comportement des encres quand leur taux de couverture varie sur une sous-couche lisse, sans piliers. Les quatre primaires présentent d'abord le même comportement : jusqu'à un taux de couverture de 50 % (40 % pour le jaune), le brillant diminue quand la quantité d'encre déposée augmente. Ajouter des gouttes d'encre colorée revient à ajouter de la rugosité : le brillant baisse en conséquence. Les encres cyan et noire, plus sombres, ont un niveau de brillant plus faible que les encres jaune et magenta. Le brillant est fonction de la clarté des encres : si la surface est sombre, le brillant est plus faible (on rappelle que la correction en clarté est effectuée pour des surfaces très mates, ce qui n'est pas le cas ici...les deux effets de rugosité et de clarté se superposent donc). Les courbes présentent un palier, avant de remonter en brillant. Cette ré-augmentation du brillant est liée à la diminution de la rugosité : plus la couverture en encre est élevée, plus l'encre est lissée, plus la rugosité diminue, et donc plus le brillant augmente.

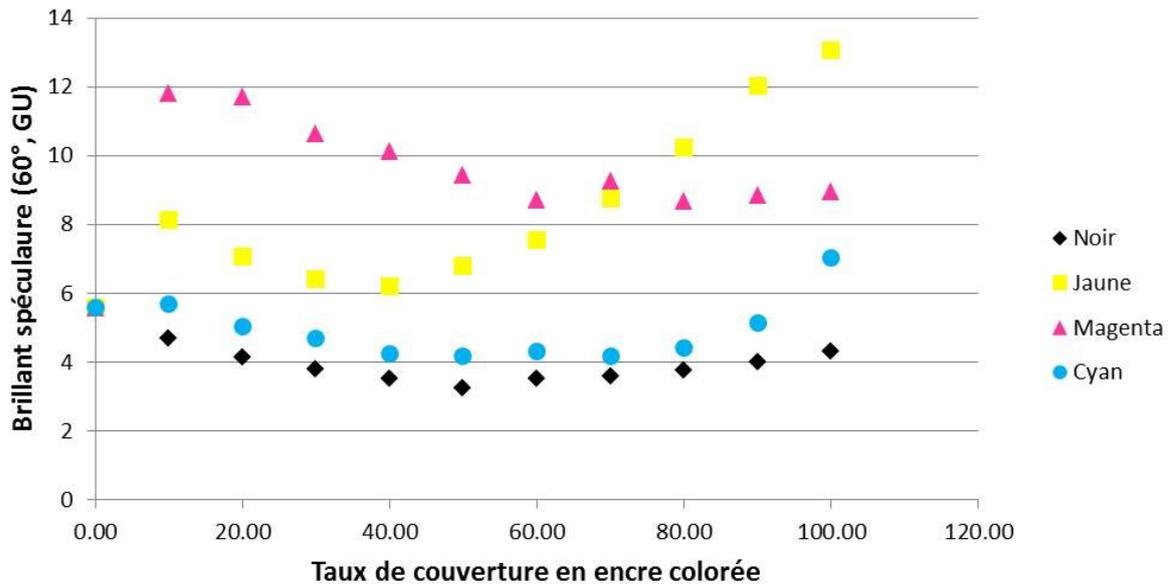


Figure B.4 22 – Brillant des quatre chartes sans piliers en fonction des pourcentages d’encre déposés.

La Figure B.4 23 présente le brillant spéculaire mesuré sur les patches colorés imprimés sur des piliers. Le brillant y reste constant et très faible jusqu’à ce que la couverture en encre dépasse les 50 % ; à partir de ce seuil, le brillant augmente linéairement. Plus la couverture en encre est élevée, plus l’encre va venir boucher les creux formés par les piliers blancs en sous-couche. La rugosité diminue donc, et le brillant augmente légèrement. Pour parer à ce phénomène, il faut augmenter la taille des piliers et maintenir ainsi une rugosité suffisante, et donc un brillant très faible.

L’effet de la couverture en encre peut donc être prédit :

- Sous 50 % de couverture, l’ajout de la couche couleur n’a pas d’influence sur l’aspect mat des surfaces ;
- Au-dessus de 50 % de couverture, le brillant spéculaire des quatre encres varie en suivant la loi :

$$gloss = 0.0272 \times \% \text{ encre} - 0.9036 \quad (E4.7)$$

Les effets de brillant peuvent être compensés en changeant la hauteur de la micro-structure en sous-couche. Ajouter une couche couleur à une sous-couche texturée diminue la rugosité, et augmente donc le brillant. Par conséquent, pour diminuer encore le brillant, il faudra ré-augmenter la hauteur des piliers. Etant donné qu’on ne peut faire varier conjointement couleur et hauteurs des piliers, nous fixons la hauteur de la sous-couche blanche à piliers à 80 µm pour tout le reste de l’étude.

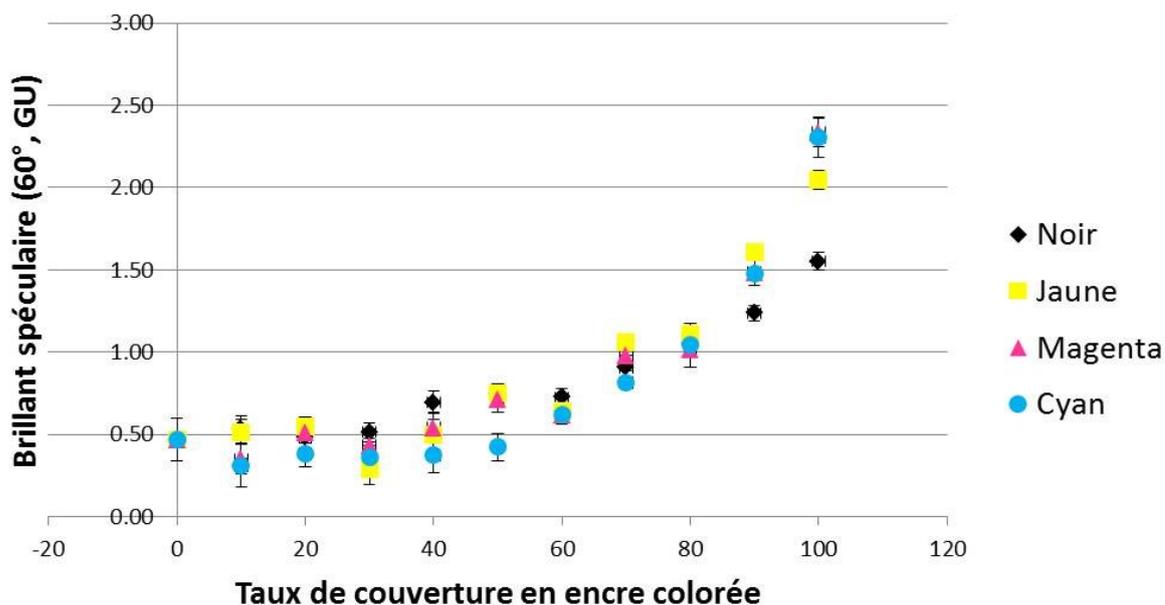


Figure B.4 23 – Brillant spéculaire à 60° des quatre chartes sur piliers en fonction des pourcentages d’encre déposés.

### 3.4 Influence des pourcentages relatifs en encre sur le niveau de brillant

#### 3.4.1 Mélanges à deux encres

Ce paragraphe présente les résultats de l’expérience (b), au cours de laquelle sont considérés des mélanges formés de deux encres colorées.

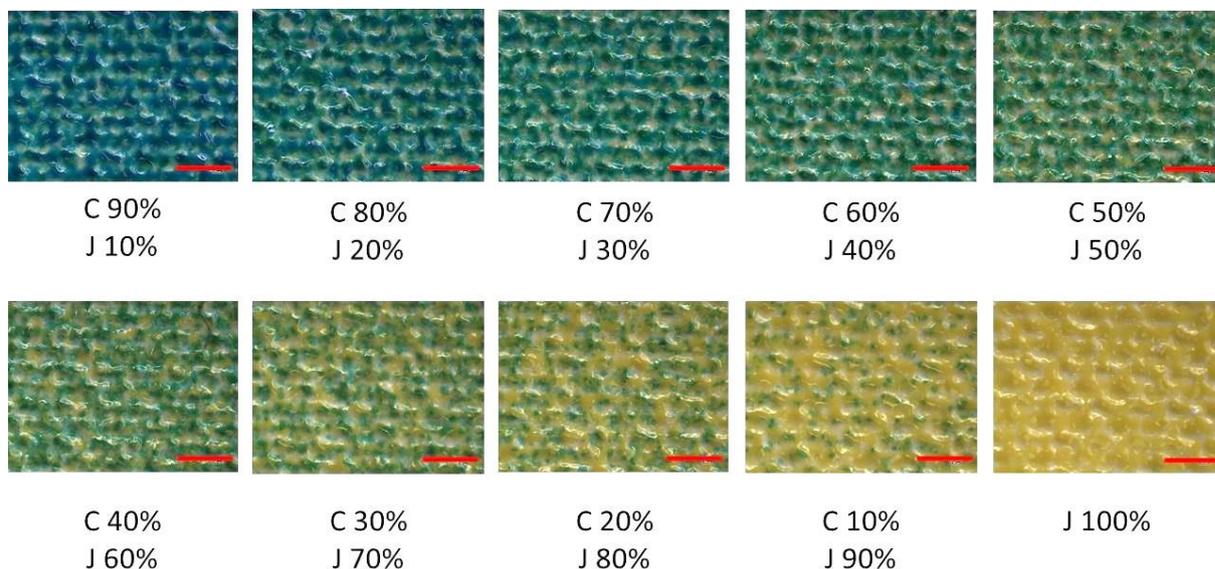


Figure B.4 24 – Charte cyan-jaune sur sous-couche blanche à piliers (80 μm) vue au microscope électronique. La barre d’échelle correspond à 500 μm.

La Figure B.4 24 illustre les procédés de tramage et de demi-ton employés pour reproduire les couleurs. On voit que le demi-ton, qui fait se superposer certaines gouttes pour obtenir une

teinte visuellement satisfaisante, crée un petit relief qui va venir s'ajouter aux piliers existants, ou au contraire les boucher. L'effet du demi-ton peut donc être « positif » (ajouter de la rugosité) ou « négatif » (diminuer la rugosité).

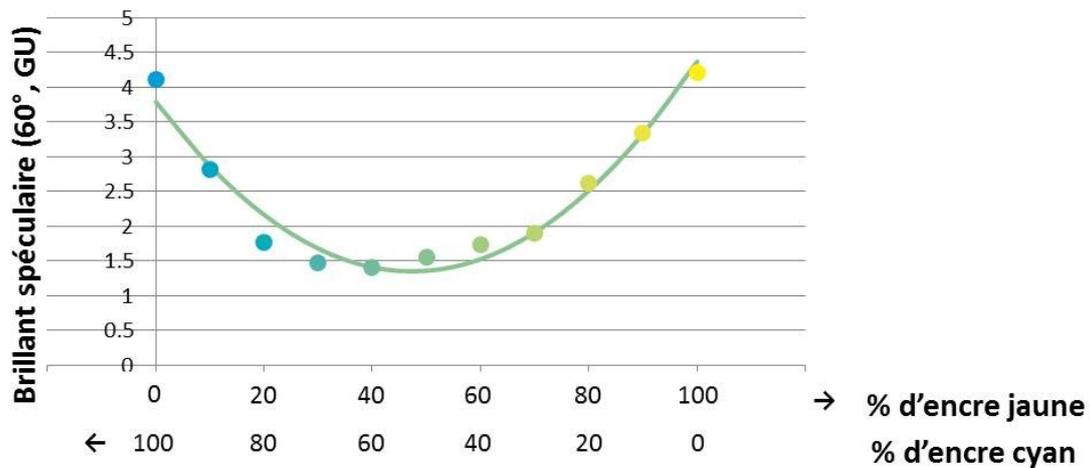


Figure B.4 25 – Brillant spéculaire à 60° de la charte Cyan – Jaune imprimée sur une sous-couche blanche à piliers à 80 µm ; points mesurés et modèle empirique déduit. Les pourcentages en encre cyan décroissent tandis que les pourcentages en encre jaune augmentent, comme indiqué sur l'échelle de l'axe des abscisses.

La Figure B.4 25 donne le brillant spéculaire à 60° en fonction des pourcentages respectifs d'encre, dans le cas Cyan – Jaune. Les autres courbes, présentées en Annexe B.4.1, sont d'allure similaire. On y lit que le brillant spéculaire est plus élevé aux extrémités, pour des encres pures à 100 %, et plus faible lorsque les encres se partagent presque à égalité la surface ([40% – 60%], [50%, 50%], [60%, 40%]). La différence en brillant n'est pas négligeable : plusieurs Gloss Units, ce qui dans la gamme des mats est tout à fait discernable par un observateur. Il est probable que cette diminution du brillant soit une conséquence du tramage et du demi-ton, qui ajoutent ici assez de rugosité pour que le brillant diminue.

On remarque donc que :

- Comme attendu, le brillant spéculaire n'est pas uniforme pour tous les mélanges colorés. On peut imaginer que la différence mesurée sera rattrapable en augmentant ou diminuant la hauteur des piliers blancs de la sous-couche.
- Les courbes sont facilement modélisables, ce qui rend la prédiction des niveaux de gloss pour les mélanges à deux encres possibles.

Nous présentons ci-après les résultats de la modélisation. Nous écrivons les pourcentages d'encre comme allant de 0 à 1 et modélisons les points expérimentaux sous la forme de polynômes du second degré. Puisque dans tous les cas, le taux de couverture total vaut 100 % (soit 1), on a pour tous les couples d'encres :

$$\% \text{ Encre}_1 + \% \text{ Encre}_2 = 1 \quad (\text{E4.8})$$

ce qui simplifie toutes les équations. Nous les donnons Table B.4 8.

Mélanges	Modèle : brillant spéculaire à 60° en fonction des % d'encre	Coefficient de Pearson
Cyan – Jaune	$g_{JC} = \alpha_{CJ} \times C^2 + \beta_{CJ} \times C + \gamma_{CJ}$	98.1 %
Jaune – Cyan	$g_{JC} = \alpha_{JC} \times J^2 + \beta_{JC} \times J + \gamma_{JC}$	
Cyan – Magenta	$g_{CM} = \alpha_{CM} \times C^2 + \beta_{CM} \times C + \gamma_{CM}$	98.3 %
Magenta – Cyan	$g_{MC} = \alpha_{MC} \times M^2 + \beta_{MC} \times M + \gamma_{MC}$	
Magenta – Jaune	$g_{MJ} = \alpha_{MJ} \times M^2 + \beta_{MJ} \times M + \gamma_{MJ}$	99.0 %
Jaune – Magenta	$g_{JM} = \alpha_{JM} \times J^2 + \beta_{JM} \times J + \gamma_{JM}$	
Noir – Cyan	$g_{NC} = \alpha_{NC} \times N^2 + \beta_{NC} \times N + \gamma_{NC}$	93.1 %
Cyan – Noir	$g_{CN} = \alpha_{CN} \times C^2 + \beta_{CN} \times C + \gamma_{CN}$	
Noir – Magenta	$g_{NM} = \alpha_{NM} \times N^2 + \beta_{NM} \times N + \gamma_{NM}$	92.8 %
Magenta – Noir	$g_{MN} = \alpha_{MN} \times M^2 + \beta_{MN} \times M + \gamma_{MN}$	
Noir – Jaune	$g_{NJ} = \alpha_{NJ} \times N^2 + \beta_{NJ} \times N + \gamma_{NJ}$	96.2 %
Jaune – Noir	$g_{JN} = \alpha_{JN} \times J^2 + \beta_{JN} \times J + \gamma_{JN}$	

Table B.4 8 – Modèles empiriques issus des courbes expérimentales qui décrivent l'allure du brillant spéculaire à 60° en fonction des pourcentages relatifs d'encre, pour des mélanges à deux encres. On utilise la lettre *C* pour désigner le taux de couverture en encre cyan, *M* pour le magenta, *J* pour le jaune et *N* pour le noir.

Comme les courbes décrivant les mélanges *Encre<sub>1</sub>* - *Encre<sub>2</sub>* sont les mêmes, et qu'on a % *Encre<sub>1</sub>* = 1 - % *Encre<sub>2</sub>*, on peut pour chaque mélange écrire les coefficients comme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{21} = \alpha_{12} \\ \beta_{21} = -(2 \times \alpha_{12} + \beta_{12}) \\ \gamma_{21} = \alpha_{12} + \beta_{12} + \gamma_{12} \end{array} \right\}$$

Les valeurs des coefficients sont données Table B.4 9.

$\alpha_{CJ}$	$\beta_{CJ}$	$\gamma_{CJ}$	$\alpha_{JC}$	$\beta_{JC}$	$\gamma_{JC}$	$\alpha_{CM}$	$\beta_{CM}$	$\gamma_{CM}$
10.8836	-11.4612	4.3663	10.8836	-10.3060	3.7887	10.3019	-10.0125	3.5217
$\alpha_{MC}$	$\beta_{MC}$	$\gamma_{MC}$	$\alpha_{MJ}$	$\beta_{MJ}$	$\gamma_{MJ}$	$\alpha_{JM}$	$\beta_{JM}$	$\gamma_{JM}$
10.3019	-10.5913	3.8111	9.3798	-9.9585	5.2335	9.3798	-8.8011	4.6548
$\alpha_{NC}$	$\beta_{NC}$	$\gamma_{NC}$	$\alpha_{CN}$	$\beta_{CN}$	$\gamma_{CN}$	$\alpha_{NM}$	$\beta_{NM}$	$\gamma_{NM}$
8.0878	-8.9857	3.5451	8.0878	-7.1899	2.6472	7.0519	-7.5856	3.0530
$\alpha_{MN}$	$\beta_{MN}$	$\gamma_{MN}$	$\alpha_{NJ}$	$\beta_{NJ}$	$\gamma_{NJ}$	$\alpha_{JN}$	$\beta_{JN}$	$\gamma_{JN}$
7.0519	-6.5182	2.5093	7.6112	-8.9699	3.8657	7.6112	-6.2525	2.5070

Table B.4 9 – Valeurs des coefficients dans le cas des mélanges mats à deux encres.

Nous utilisons la charte de la Figure B.4 26 pour tester nos polynômes. Nous sommes dans les cas à deux encres Cyan – Magenta, Cyan – Jaune et Magenta – Jaune.

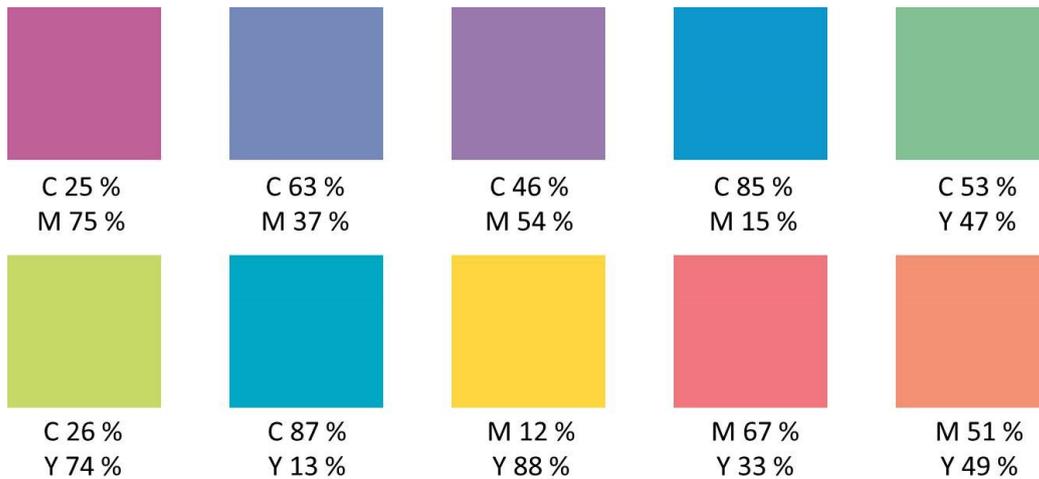


Figure B.4 26 – Chartre test présentant des mélanges à deux encres Cyan – Jaune, Cyan – Magenta et Magenta – Jaune.

Pour chacun des patches tests, le brillant spéculaire modélisé grâce aux équations de la Table B.4 8 est comparé avec les résultats du glossmètre, corrigés en clarté. Les résultats sont donnés Figure B.4 27.

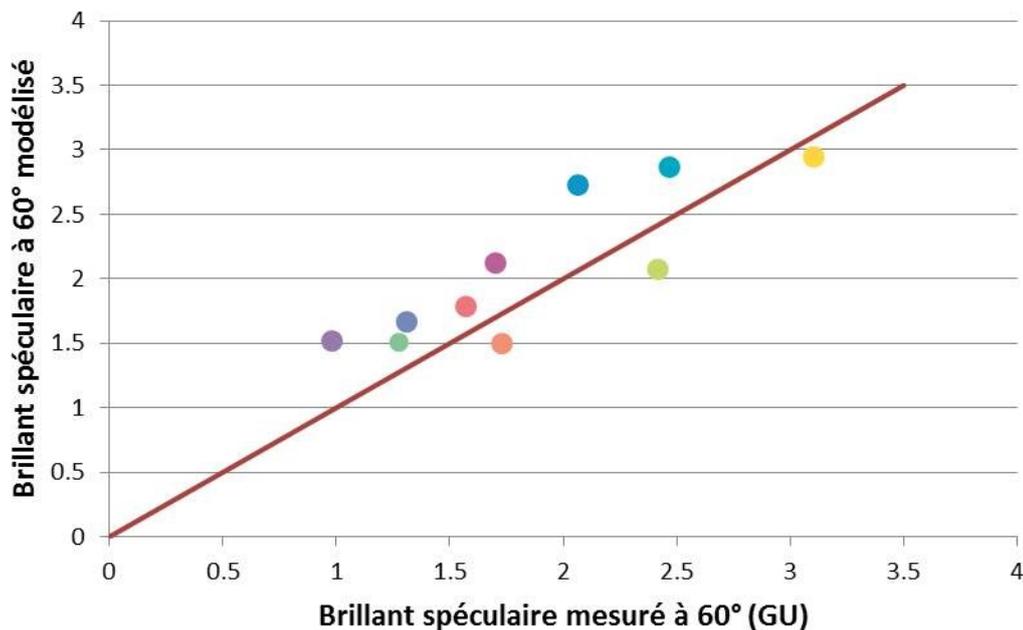


Figure B.4 27 – Résultats du test à deux encres. Le brillant spéculaire à 60° donné par les équations de la Table B.4 8 est tracé en fonction du brillant spéculaire à 60° mesuré et corrigé en clarté.

Sur la Figure B.4 27, les points sont répartis autour de la droite de pente unitaire, ce qui valide notre modèle. Les résultats de ce rapide test sont positifs : l'écart entre le brillant prédit et le brillant mesuré est faible. C'est particulièrement vrai pour le mélange des deux encres

Magenta et Jaune. Dans l'ensemble, les trois modèles établis pour les mélanges Cyan – Magenta, Cyan – Jaune et Magenta – Jaune sont satisfaisants.

### 3.4.2 Mélanges à trois encres

Nous présenterons ici les résultats obtenus pour le mélange à trois encres Cyan, Magenta et Jaune. Nous avons vu que les mélanges à deux encres étaient modélisables, via la mise en place de polynômes du second degré. Est-ce toujours le cas des mélanges à trois encres ? Nous reprenons le même protocole et construisons l'espace du brillant en fonction des pourcentages d'encres. On peut écrire ici :

$$\% \text{ Encre}_1 + \% \text{ Encre}_2 + \% \text{ Encre}_3 = 1 \quad (\text{E4.9})$$

et donc :

$$\% \text{ Encre}_1 + \% \text{ Encre}_2 = 1 - \% \text{ Encre}_3 \quad (\text{E4.10})$$

ce qui permet de réduire l'espace à trois dimensions ( $\text{Encre}_1$ ,  $\text{Encre}_2$  et brillant), l' $\text{Encre}_3$  se déduisant des deux précédentes.

La Figure B.4 28 illustre ce qui se passe dans le cas des trois encres Cyan, Magenta et Jaune. Les points se répartissent le long d'une surface courbe représentée dans un espace à trois dimensions : les taux de couverture en encre Cyan, Magenta, et le brillant spéculaire.

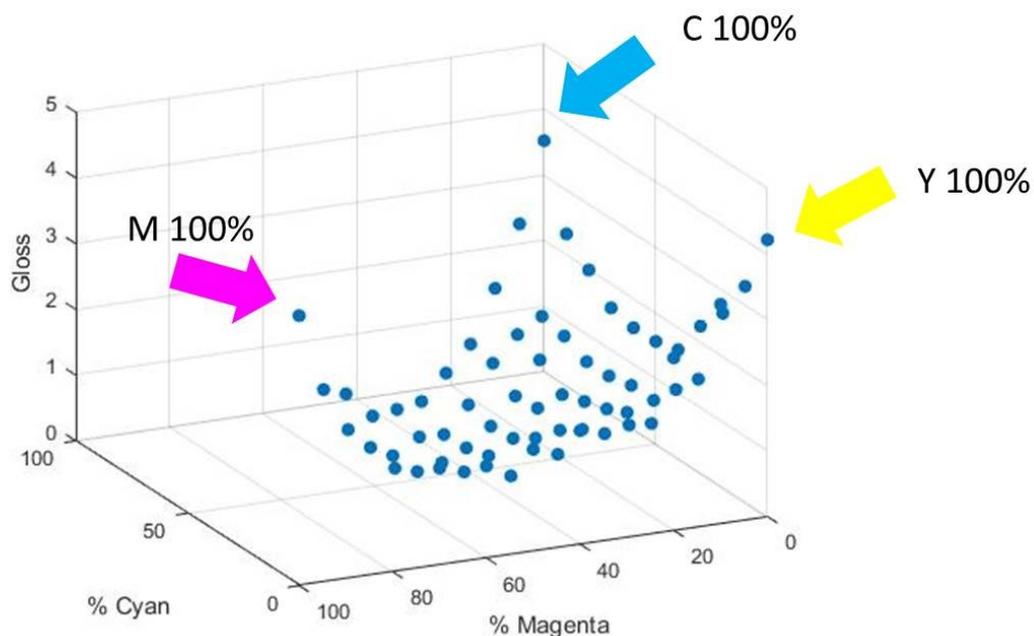


Figure B.4 28 – Représentation des points mesurés dans un espace à trois dimensions formé par le brillant spéculaire à 60°, le pourcentage d'encre cyan et le pourcentage d'encre magenta. Le pourcentage d'encre jaune se déduit des deux précédents.

Une modélisation polynomiale d'ordre 2 nous donne l'équation de la surface qui modélise les points expérimentaux :

$$\text{gloss}(60^\circ) = a_1 \times C^2 + b_1 \times C + c_1 \times M^2 + d_1 \times M + e_1 \times J^2 + f_1 \times J + g_1 \quad (\text{E4.11})$$

soit en utilisant

$$\% C + \% M = 1 - \% J \quad (\text{E4.12})$$

$$\text{gloss}(60^\circ) = a_2 \times C^2 + b_2 \times M^2 + c_2 \times C + d_2 \times M + h_2 \times C \times M + g_2 \quad (\text{E4.13})$$

avec

$$\left\{ \begin{array}{l} a_2 = a_1 + e_1 \\ b_2 = c_1 + e_1 \\ c_2 = b_1 - 2 \times e_1 - f_1 \\ d_2 = d_1 - 2 \times e_1 - f_1 \\ h_2 = 2 \times e_1 \\ g_2 = f_1 + g_1 + e_1 \end{array} \right.$$

Les valeurs des coefficients dans notre cas Cyan – Magenta – Jaune sont donnés Table B.4 10. Les courbes à deux encres ont été incluses dans cette modélisation empirique. La surface modèle est donnée Figure B.4 29.

$a_2$	$b_2$	$c_2$	$d_2$	$h_2$	$g_2$
9.2638	8.2156	-9.9325	-9.1077	9.3647	4.0702

Table B.4 10 – Valeurs des coefficients dans le cas des mélanges mats à trois encres (ici Cyan – Magenta – Jaune).

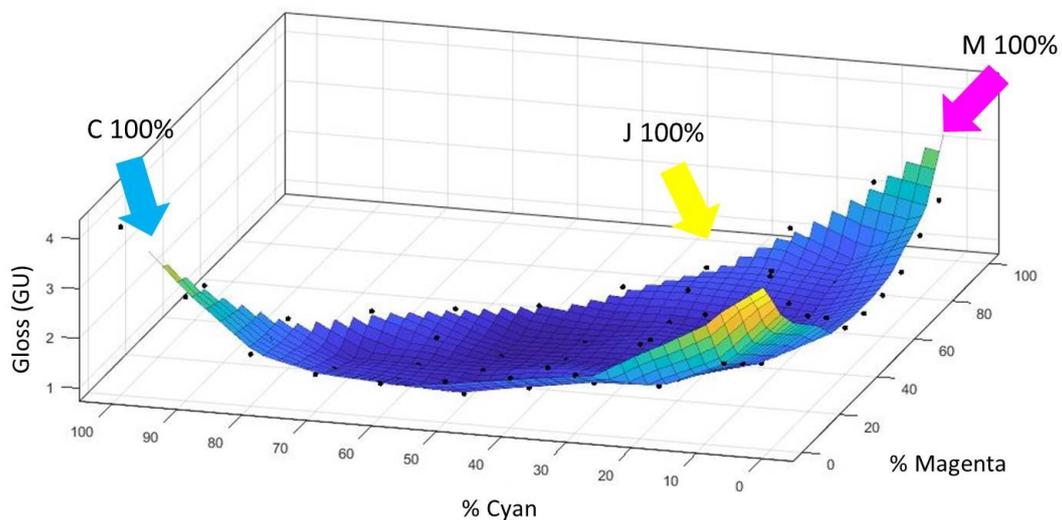


Figure B.4 29 – Points mesurés et surface modèle dans un espace à trois dimensions formé par le brillant spéculaire à 60°, le pourcentage d'encre cyan et le pourcentage d'encre magenta. Le pourcentage d'encre jaune se déduit des deux précédents.

L'équation (E4.11) s'écrit de manière matricielle comme :

$$gloss(60^\circ) = EM_1 {}^tE + EM_2 + M_3 \quad (E.15)$$

avec  $E = (C \ M \ J)$  et  $M_1, M_2$  et  $M_3$  les matrices des coefficients :

$$M_1 = \begin{pmatrix} 2.2 & -1.9 & -2.4 \\ -1.9 & 1.9 & -2.1 \\ -2.4 & -2.1 & 2.2 \end{pmatrix}; \quad M_2 = \begin{pmatrix} 0.8 \\ 0.8 \\ 1.5 \end{pmatrix}; \quad M_3 = 0.4$$

### 3.4.3 Mélanges à quatre encres

Enfin, le même protocole se répète pour les mélanges à quatre encres. Cette fois-ci :

$$\%C + \%M + \%J + \%N = 1 \quad (E4.16)$$

$$\%C + \%M = 1 - \%J - \%N \quad (E4.17)$$

On ne peut pas réduire l'espace à 3 dimensions ; il faut nous contenter de projections dans les plans. La visualisation est par conséquent plus complexe. Nous donnons simplement l'équation de la fonction qui modélise le brillant spéculaire à  $60^\circ$  en fonction des pourcentages d'encre. Il s'agit d'un polynôme d'ordre 2 qui ne présente qu'un seul point d'inflexion :

$$gloss(60^\circ) = a \times C^2 + b \times C + c \times M^2 + d \times M + e \times J^2 + f \times J + h \times N^2 + i \times N + j \times C \times M \times J + k \times C \times M \times N + l \times C \times J \times N + m \times M \times J \times N + n \times C \times M \times J \times N + o \quad (E4.18)$$

avec un coefficient de Pearson à 96.3 %. Les valeurs des coefficients sont données Table B.4 11.

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>h</i>
4.8433	-0.7132	3.8012	0.1826	4.8944	-0.0019	3.4155
<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>o</i>
0.6322	8.6815	6.5178	9.4310	9.02743	1.0000	-0.8087

Table B.4 11 – Valeurs des coefficients dans le cas des mélanges mats à quatre encres.

Si l'on élimine les termes croisés de l'équation (E4.18), le brillant s'écrit de manière matricielle comme :

$$gloss(60^\circ) = EM_1 {}^tE \quad (E4.19)$$

avec  $E = (C \ M \ J \ N \ 1)$  et  $M_1$  la matrice des coefficients :

$$M_1 = \begin{pmatrix} 3.97 & -0.16 & -0.31 & 0.03 & 0.04 \\ -0.16 & 3.44 & -0.01 & 0.19 & 0.23 \\ -0.31 & -0.01 & 4.04 & 0.17 & 0.37 \\ 0.03 & 0.19 & 0.17 & 3.05 & 0.42 \\ 0.04 & 0.23 & 0.37 & 0.42 & -0.86 \end{pmatrix}$$

Le coefficient de Pearson reste supérieur à 90%.

## 4. Gestion de la couleur mate

Cette dernière partie a pour but de remettre les études précédentes dans le contexte de l'impression 2.5D d'objets. Comment faire, en pratique, pour choisir la hauteur des piliers à imprimer et pour produire le brillant spéculaire désiré, selon la couleur à reproduire ?

### 4.1 De l'objet à l'imprimé

Deux cas de figure peuvent se présenter. Dans le premier cas, l'objectif est d'imprimer un objet neutre, de brillant fixé par l'utilisateur et de couleur choisie. C'est le cas des imprimés « design » : un créateur choisit de A à Z les paramètres d'apparence de l'objet qu'il souhaite réaliser. Cette configuration est la plus simple à mettre en pratique, dans la mesure où aucun objet réel n'existe : la comparaison n'est pas possible. Dans le deuxième cas, l'objectif est de reproduire un objet réel (surfaces monochromatiques et « mono-brillant » comme le bois, le plâtre, la céramique ou surfaces complexes, polychromatiques et aux niveaux de brillant variés), et la comparaison entre l'original et l'imprimé rend le protocole plus exigeant. Néanmoins, dans un cas comme dans l'autre, l'objet initial est défini par ses paramètres d'apparence (forme, couleur, brillant) et l'imprimé doit lui être le plus proche possible.

Caractéristiques d'apparence de l'objet réel	Caractéristiques d'apparence de l'imprimé
Forme $xyz$	Forme $xyz$
Couleur mesurée $L^* a^* b^*$	Couleur commandée $CMJN$
Brillant mesuré $g$	Brillant commandé $g$
Rugosité mesurée $S_{q1}$	Rugosité mesurée $S_{q2}$

Table B.4 12 – Caractéristiques d'apparence de l'objet réel et de l'imprimé.

La Table B.4 12 récapitule les paramètres d'apparence qui entrent en jeu. La forme de l'objet sera reproduite à l'identique par l'imprimante, aux variations causées par l'étalement de l'encre près (négligeables à grande échelle). Mais précisons les choses pour le brillant et la couleur.

#### 4.1.1 Brillant

Nous avons vu dans le chapitre B.3 que la gestion du brillant spéculaire via l'implémentation de motifs réguliers dont la hauteur changeait suffisait à introduire chez l'observateur la sensation de mat recherchée. Le motif le plus intéressant, I, a été présenté au chapitre B.3 et c'est avec lui que nous avons effectué toutes nos recherches en couleur. La Figure B.4 30 rappelle l'allure de sa courbe.

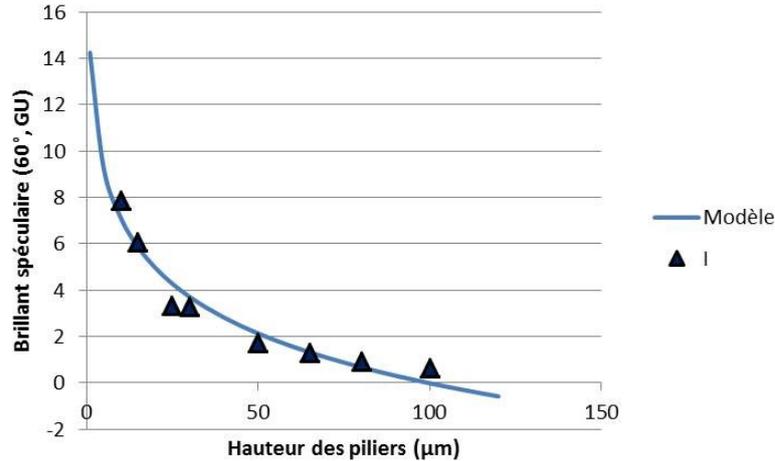


Figure B.4 30 – Configuration I ; brillant spéculaire à 60° en fonction de la hauteur des piliers implémentée.

L'imprimé mat est donc conçu pour que son brillant spéculaire à 60°  $g$  soit similaire au brillant de l'objet réel, mais sa rugosité différera forcément : la micro-structure I mise en place est différente de la rugosité de l'objet réel. Le brillant prime.

La fonction donnant le brillant spéculaire à 60° en fonction de la hauteur des piliers implémentée s'écrit :

$$g(60^\circ) = -2.4189 \times \ln(h) + 12.6431 \quad (\text{E4.20})$$

avec un coefficient de Pearson à 98.3 %. Cette fonction ayant été établie pour des échantillons monochromatiques, nous avons vu qu'une différence de couleur de l'échantillon impliquait un décalage en ordonnées des courbes ; on peut considérer que l'ordonnée à l'origine contient l'information sur les pourcentages d'encre. On écrit ainsi :

$$g(60^\circ) = f_{1,NCMJN}(h) = -\delta \times \ln(h) + \varepsilon(C, M, J, N) \quad (\text{E4.21})$$

Le brillant spéculaire à 60° est décrit comme une fonction logarithmique décroissante de  $h$ , la hauteur des piliers, donc le terme constant dépend des pourcentages d'encre. Pour savoir quelle hauteur appliquer pour obtenir un certain brillant, on inverse l'équation (E4.18), ce qui donne :

$$h = \exp\left(\frac{1}{\delta}(\varepsilon(C, M, J, N) - g(60^\circ))\right) \quad (\text{E4.22})$$

#### 4.1.2 Couleur

Pour une hauteur de piliers fixée à  $h_{80} = 80 \mu\text{m}$ , nous avons dans ce chapitre déterminé la fonction donnant le brillant spéculaire à 60° en fonction des pourcentages d'encre :

$$g(60^\circ) = f_{2,h_{80}}(C, M, J, N) \quad (\text{E4.23})$$

(E4.20) vaut (E4.16) comme nous l'avons déterminé au paragraphe précédent.

En insérant cette fonction pour cette hauteur dans l'équation (E4.21), on trouve :

$$g(60^\circ) = f_{1, \forall CMJN}(h_{80}) = -\delta \times \ln(h_{80}) + \varepsilon(C, M, J, N) = f_{2, h_{80}}(C, M, J, N) \quad (\text{E4.24})$$

ce qui donne :

$$\varepsilon(C, M, J, N) = f_{2, h_{80}}(C, M, J, N) + \delta \times \ln(h_{80}) \quad (\text{E4.25})$$

En injectant (E4.25) dans (E4.24), il vient :

$$h = \exp\left(\frac{1}{\delta} \left( f_{2, h_{80}}(C, M, J, N) + \delta \times \ln(h_{80}) - g(60^\circ) \right)\right) \quad (\text{E4.26})$$

Tous les paramètres de l'équation (E4.26) sont connus. L'utilisateur n'a plus qu'à choisir une valeur de brillant spéculaire  $g(60^\circ)$  et à connaître les pourcentages relatifs d'encres pour déterminer la hauteur des piliers à implémenter.

## 4.2 Profil ICC et gamut de la couleur mate

Nos algorithmes reposent sur la connaissance des pourcentages d'encre relatifs. Or les images avec lesquelles nous travaillerons sont encodées en  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ . Pour faire le lien entre  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  et CMJN, il est nécessaire d'effectuer un profil ICC.

Nous effectuons un profil ICC sur une sous-couche blanche à piliers de hauteur 80  $\mu\text{m}$ . Le cas est à rapprocher du textile, qui est un support connu des imprimeurs, et qui présente également un léger relief. Nous renvoyons ainsi aux publications ayant traité du sujet [120]. Notons qu'en particulier, tous les spectrophotomètres ne sont pas adaptés à la mesure de la couleur en relief ; le XRite™ Ci62 est indiqué, comme l'a montré [120].

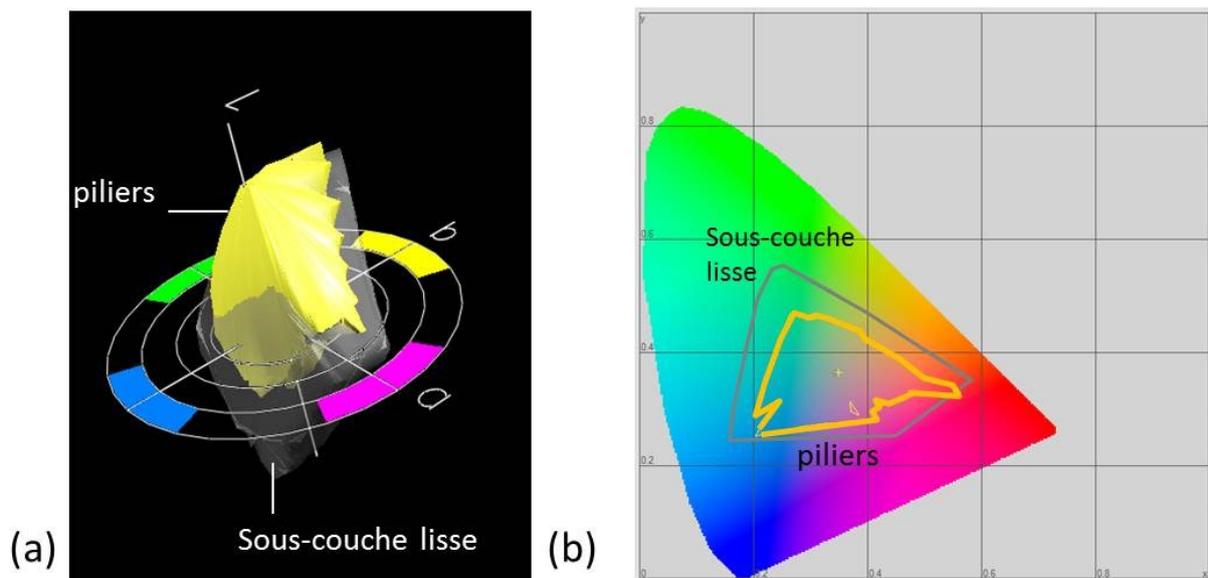


Figure B.4 31 – Gamuts. (a) Représentation du gamut sur fond lisse (forme grise) et du gamut sur micro-structure à piliers (forme jaune). (b) La même chose, projetée dans le diagramme de chromaticité  $xy$  à  $L^* = 50$ .

La Figure B.4 31 sur laquelle est représenté le « gamut des piliers de hauteurs  $80 \mu\text{m}$  » en regard avec le « gamut sur sous-couche lisse » nous montre que le nombre de couleurs reproductibles par l'imprimante sur une couche rugueuse est inférieur à celui d'une couche lisse. Les couleurs sombres ne peuvent être reproduites de manière satisfaisante, en tous cas pas dans cette configuration où une sous-couche blanche à piliers crée la sensation mate. Cela était attendu ; c'est une limite de notre procédé. A l'inverse, le gamut est légèrement plus étendu dans la série des couleurs de clarté élevée.

## 5. Conclusion : workflow de l'apparence

Au cours de ce chapitre, nous avons cherché quelle était la meilleure stratégie pour imprimer des objets colorés au niveau de matité maîtrisé. Après avoir réalisé que la couverture en encre et les pourcentages relatifs de chacune des encres influent sur le brillant, nous avons mis en place une série d'expériences et modélisé l'impact de ces paramètres sur le brillant. En combinant les résultats de ces modélisations avec les résultats du chapitre B.3, dans lequel nous présentons l'influence de la rugosité sur le brillant, nous sommes arrivés à un modèle général prenant en compte brillant et couleur, et permettant le calcul de la hauteur des piliers. L'uniformisation des niveaux de brillant colorés est alors rendue possible.

Bien sûr, l'ensemble du protocole peut être repris avec une autre configuration en sous-couche. Notons que le *machine learning* pourrait être avantageusement utilisé pour compiler toutes les informations établies en fonction des paramètres d'impression et en tirer une loi.

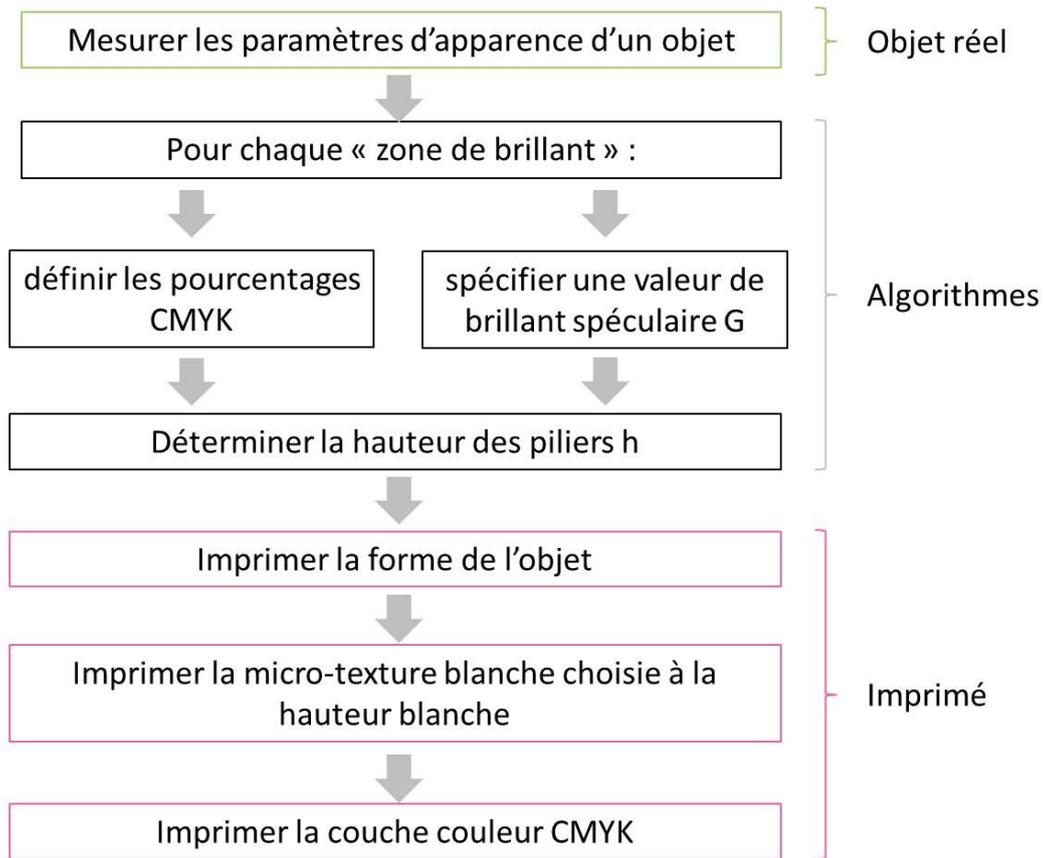


Figure B.4 32 – Workflow de l'apparence.

La Figure B.4 32 présente le workflow de l'apparence tel que nous l'avons établi et utilisé. Les paramètres d'apparence (brillant spéculaire et couleur  $L^*a^*b^*$ ) sont connus ; de ces paramètres sont déduits dans un premier temps les pourcentages d'encre CMJN via un profil ICC, et donc la hauteur des piliers à implémenter. Sur la forme de l'objet, imprimée selon les procédés classiques, une micro-structure à la hauteur calculée est implémentée, cette hauteur étant différente selon les couleurs de la couche et le brillant. La couche couleur est ensuite imprimée sur les piliers. Notons que le gamut à 4 dimensions ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  et  $g$ ) devient une réalité : les performances de l'imprimante peuvent être déterminées en fonction du brillant et des couleurs reproductibles. Ainsi le profil ICC, qui sert à la détermination du gamut, peut être également étendu à la 4<sup>ème</sup> dimension, le brillant : ceci ouvre la voie à de nouveaux protocoles de calibrage des imprimantes.



## PARTIE C

# Reproduction de matériaux mats réels



## Partie C – Reproduction de matériaux mats réels

La Partie B a montré comment on pouvait contrôler les aspects mats, de manière à produire toute une gamme de surfaces d'un brillant spéculaire allant de 0 à 10 Gloss Units. Dans cette zone, l'œil humain est très sensible aux faibles variations, ce qui rend le travail délicat : les effets annexes, tels le scintillant ou la texture, rendent fragile l'aspect mat créé, selon la distance d'observation à laquelle on le considère.

Si ces effets peuvent être ennuyeux dans un contexte purement industriel, ils sont au contraire bénéfiques dans le cadre d'une restauration d'objet ancien : en effet, ils s'accordent avec l'éthique du restaurateur, qui vise à ce qu'une retouche soit visible d'une manière ou d'une autre par tout type de public. Dans notre cas, on imagine facilement un comblement invisible à plus d'un mètre, et distinguable grâce à un léger scintillement à courte distance.

La Partie C qui s'ouvre ici traite ce sujet. La technologie d'impression en relief est mise en regard des besoins du domaine du patrimoine, et analysée afin de savoir si elle satisfait aux critères de la restauration des objets d'art : stabilité, réversibilité, lisibilité. Nous présentons ensuite cinq cas d'application.



# Chapitre C.1. Réflexions sur l'utilisation de l'impression 2.5D dans le domaine du patrimoine culturel

Dans les parties précédentes, nous avons décrit le procédé d'impression en relief (2.5D) et vu comment ses performances pouvaient être améliorées afin de créer une sensation visuelle mate. A présent, nous souhaitons montrer comment la technologie 2.5D peut aider la conservation-restauration du patrimoine.

Ce chapitre est divisé en trois sections. Tout d'abord, nous voulons justifier notre démarche : quantifier l'apparence des objets est une réelle problématique des restaurateurs, et reproduire les aspects de surface devient un enjeu. Dans un second temps, nous interrogeons la technologie d'impression 2.5D en regard des principes de la restauration des objets d'art : impression et restauration sont-ils compatibles ? Enfin, nous présentons la démarche d'étude des œuvres qui sera suivie et mènera (nous l'espérons) à leur reproduction réaliste.

# 1. Quantifier, restaurer, reproduire

## 1.1 La mesure de l'apparence pour le patrimoine

La mesure de l'apparence est un point clé de l'analyse des œuvres d'art, en particulier avant et après une étape de restauration. Si la mesure de la couleur est largement connue et presque systématiquement effectuée lors des études (le plus souvent via la spectrographie), la mesure des autres paramètres de l'apparence – brillant, texture, transparence, rugosité, forme – est moins répandue. Quelques articles se focalisent tout de même sur l'analyse de la rugosité. Citons tout particulièrement Wei [121, 122] qui utilise un capteur confocal sans contact pour mesurer la rugosité des surfaces, et relie la rugosité mesurée aux différences d'états de surface perçues. L'équipe de Wei applique cette technologie de mesure à des cas précis d'analyse avant et après restauration. En 2003, une équipe de Florence a étudié la rugosité de différentes zones de la statue monumentale du David de Michel-Ange avec un instrument développé par une université italienne [123]. L'équipe a ensuite comparé ces résultats avec les mêmes mesures, répétées après restauration de la statue. D'autres études présentent le même type d'analyses avant/après restauration, sur d'autres surfaces, comme la peinture sur toile [124, 125]. Notons que toutes ces analyses considèrent majoritairement un unique paramètre de rugosité,  $R_q$ , sur un unique type de mesure, le profil. Un mémoire INP de 2016 se démarque en proposant une analyse multidimensionnelle en rugosité, issue de cartographies en deux dimensions [126].

Il faut retenir en tous cas que la mesure de l'apparence, non-destructive, a toute sa place dans les protocoles scientifiques d'analyse d'objets du patrimoine. S'il est très simple de quantifier la couleur d'un repeint de restauration (à condition que les éclairages soient fixés<sup>8</sup>), pour certaines surfaces, la mesure de la rugosité ou du brillant serait plus intéressante. L'aspect quantitatif est important, et trop souvent négligé en restauration : chiffrer une modification de surface permet de justifier une démarche et d'indiquer clairement ce qui a été fait. Par exemple, mesurer la rugosité et la couleur de l'original et celle de plusieurs tests de restauration utilisant des matériaux différents peut permettre de choisir la bonne configuration.

## 1.2 Reproduire un objet ou une partie d'objet

### 1.2.1 Aspects muséographiques

En muséographie, tous les moyens sont bons pour transmettre une information. Souvent colorées, les reproductions permettent au grand public (adultes comme enfants) :

- de toucher l'œuvre ou certaines parties de l'œuvre afin d'en appréhender la structure ;
- de montrer l'apparence réelle de l'œuvre avant dégradation causée par le temps ;

---

<sup>8</sup> L'éclairage D65 qui simule une lumière naturelle est systématiquement recommandé et utilisé par les restaurateurs du patrimoine français.

- de montrer l'œuvre réelle, trop fragile pour être exposée. C'est le cas par exemple de la « Dame à la capuche » conservée au Musée national d'archéologie de Saint Germain en Laye, ou de la couronne de fer exposée parmi le trésor de la cathédrale de Monza. Ces deux pièces fameuses sont toutes deux des reproductions, les originaux étant dans les deux cas visibles sur demande.

Plusieurs exemples sont donnés Figure C.1 1 et suivantes. Dans le cas des publics malvoyants, la question se complique puisque la reproduction doit permettre une lecture complète de l'œuvre uniquement de manière tactile (Figure C.1 2, Figure C.1 3 et Figure C.1 4). Les consignes sont différentes et portent sur la finesse du relief distinguable au toucher, le nombre maximum de niveaux à imprimer [127]. Un mauvais respect de ces consignes donne un imprimé inutilisable : le relief serait illisible pour une personne malvoyante.

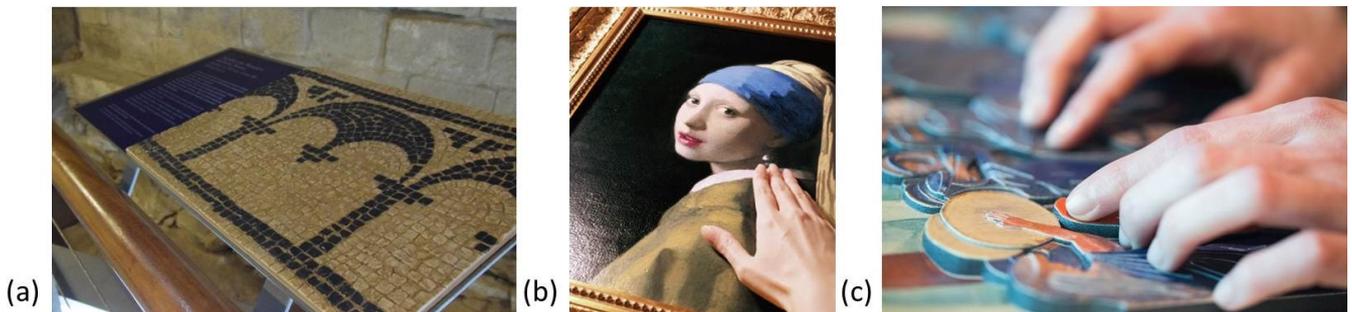


Figure C.1 1 – Exemples de reproductions pour investigations tactiles grand public. (a) Cas d'une mosaïque romaine, Casa do Infante, Porto. Image : M. Page, C2RMF, 2017. (b) Reproduction de *La Jeune Fille à la Perle*, Vermeer, effectuée par Canon™ et Océ™. Image : Canon™. (c) Image issue de l'exposition « Peintures du lointain » du musée du Quai Branly, Paris. Image : Océ™.

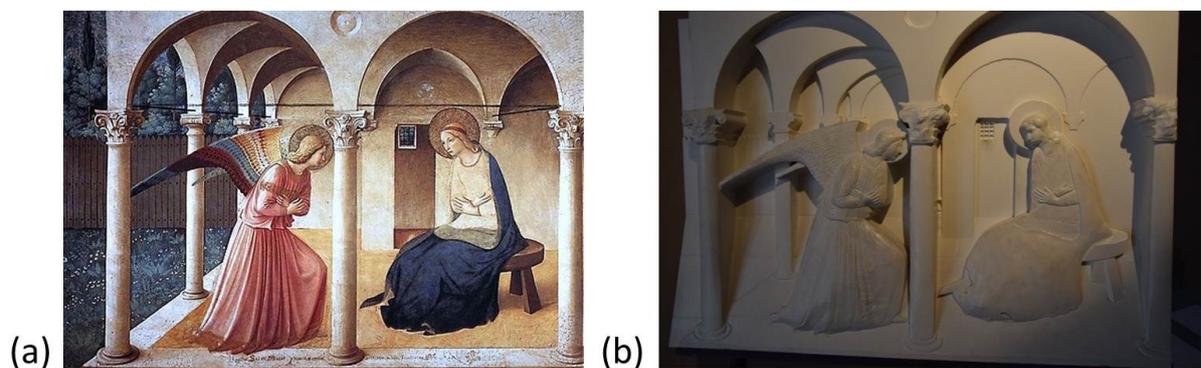


Figure C.1 2 – Exemple de reproduction pour lecture tactile par un public malvoyant. Le dessin est simplifié et on ne voit aucun effet de couleur ni de brillant : ce bas-relief est prévu pour une lecture tactile. (a) Fra Angelico, *Annonciation*, 1437, fresque, couvent de San Marco, Florence. Image : wikipedia.fr. (b) Reproduction tactile, couvent de San Marco, Florence. Image : M. Page, C2RMF, 2018.



Figure C.1 3 – Un autre exemple, là aussi conçu pour une lecture par des malvoyants. (a) Le Caravage, *Madeleine repentante*, 1593-1594, huile sur toile, FC 357, Galerie Doria-Pamphilj, Rome. Image : wikipedia.fr. (b) Reproduction tactile, présentée à l'exposition consacrée au Caravage à Rome en 2017. Image : www.abc.es.

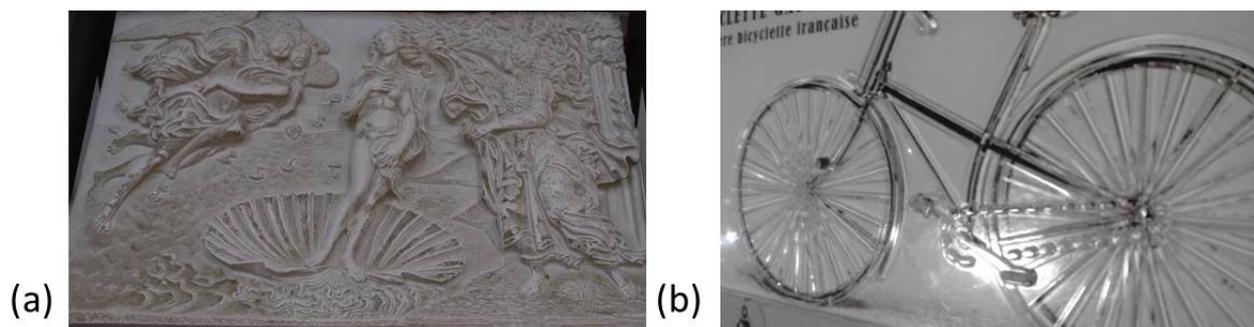


Figure C.1 4 – Exemples de reproductions à double visée. (a) Ce bas-relief des Offices qui représente *La Naissance de Vénus* de Botticelli est affiché comme destiné aux malvoyants mais il paraît bien trop détaillé pour être utile. Dans les salles, il est systématiquement touché par le public. Image : M. Page, C2RMF, 2018. (b) Panneau de présentation de la première bicyclette française au Musée d'Art et d'Industrie de Saint-Etienne. Cet affichage est à double utilité : la couche couleur donne des explications au grand public, et la surcouche en plastique présente un dessin en relief et de l'écriture Braille. Image : M. Page, C2RMF, 2017.

Les supports pédagogiques utilisés par les musées pour les ateliers spéciaux ou la diffusion dans les régions sont également souvent des reproductions d'artefacts ou d'œuvres picturales.

### 1.2.2 Conservation des œuvres

Certaines questions de conservation peuvent aussi nécessiter la création de copies des œuvres. Citons tout particulièrement l'idée de « matériaux-thèque » : les musées ou les laboratoires constituent parfois des banques de matériaux, où un exemplaire de chaque type de surface est conservé (Figure C.1 5). On pourrait imaginer une banque de matériaux « virtuels » : au lieu des originaux, des surfaces pourraient être reproduites par impression et

conservées. C'est donc la sensation visuelle qui serait conservée plutôt que la matérialité même de l'objet ; pour certaines applications, cela pourrait être intéressant. Le marbre par exemple présente divers aspects selon la technique de sculpture : une matériau-thèque « aspect sculptés du marbre », qui ne pourrait exister autrement que grâce à la reproduction, pourrait être d'usage commode pour les spécialistes. Dans la même veine, une « technico-thèque », banques de référentiels de diverses techniques, pourrait être d'un certain intérêt aux chercheurs, aux conservateurs et aux professeurs. D'un point de vue pédagogique, ce type d'impressions en relief de surfaces serait un support pertinent pour l'archéologie, l'histoire de l'art et la restauration<sup>9</sup>. De la même façon, une bibliothèque de traces d'outils permettrait l'authentification et la datation des techniques.

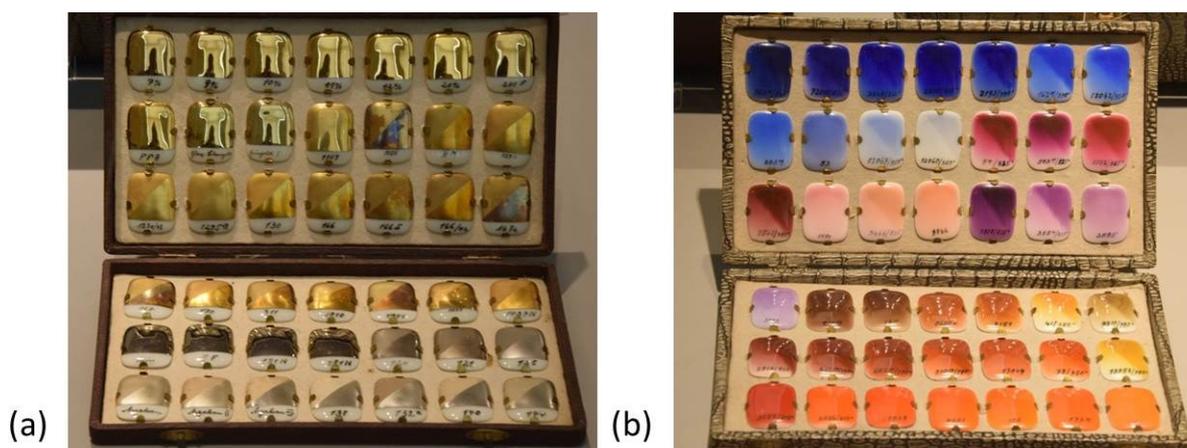


Figure C.1 5 – Exemple de bibliothèque de matériaux. Ici des échantillons de porcelaines avec différents revêtements, mats et brillants en (a) et colorés en (b). Porcelaine de Degussa, Musée de la Céramique de Sacavém, Portugal. Exposition au Musée ethnographique de Lisbonne.

Images : M. Page, C2RMF, 2017.

Notons de plus que souvent, dans les laboratoires du patrimoine, les objets ne sont disponibles pour les analyses que quelques jours. En créer une reproduction pourrait faciliter le travail du conservateur, qui garderait l'œuvre sous les yeux. Cela est envisageable à partir du moment où la copie est métrologiquement fidèle. En particulier, on pourrait créer des reproductions fiables de l'œuvre avant restauration, et conserver ainsi une trace de l'état visuel initial de l'artefact.

### 1.2.3 Restauration

En restauration, les problématiques sont différentes. La reproduction est rarement utile, à l'exception des cas de comblements de lacunes. Même si cela n'est pas fréquent, il arrive que le comblement soit envisageable :

- Un objet extrêmement fragmentaire ne pourra être présenté sous vitrine sans la création d'une matrice qui tiendra ses différentes parties. La déontologie de la restauration en vigueur en France depuis plusieurs dizaines d'années préconise la

<sup>9</sup> Sur les conseils de Dominique Robcis, conservateur spécialisé dans les Arts du Métal, C2RMF.

création d'une matrice qui soit détectable à l'œil par tout observateur, même non spécialiste.

- Un objet lacunaire dont on connaît un autre exemplaire pourrait être complété de manière réaliste pour faciliter sa lecture. Par exemple, les doigts d'une statue pourraient être recréés si l'on connaissait leur position grâce à un second tirage de la statue, une copie ancienne ou un moulage.

La restauration proposée doit dans tous les cas respecter les règles en vigueur : stabilité, réversibilité et lisibilité. Dans la suite de ce manuscrit, nous nous pencherons tout particulièrement sur cette question du comblement des lacunes.

### **1.3 Cas des comblements**

#### **1.3.1 Choix de la méthode**

Quel procédé choisir pour reproduire un objet ou combler une lacune ? Différents facteurs entrent en jeu :

- la forme de l'objet à recréer ;
- son apparence (couleur, brillant, texture) ;
- le matériau qui composera le comblement.

Dans leur pratique quotidienne, les restaurateurs utilisent des matériaux stables connus qui s'adaptent aux exigences éthiques. Mais dans certains cas, créer un comblement avec un procédé d'impression en relief serait plus avantageux que faire un comblement traditionnel, à la main. Par exemple, en sculpture sur marbre, les comblements sont fréquemment en plâtre : l'aspect travaillé du plâtre est illusionniste même si la matière est nettement différente. Toutefois, réaliser un relief complexe en plâtre peut être long et difficile. L'association avec le numérique (étape de scan 3D, acquisition de l'apparence, et impression) peut profiter au restaurateur (gain de temps) tout comme aux nouvelles technologies (nouveaux challenges). Pour certains matériaux, on peut espérer que l'impression donne des résultats bien plus illusionnistes que la restauration traditionnelle.

#### **1.3.2 Exemples**

Les procédés de restitution par impression sont de plus en plus présents en restauration. Mais s'ils font régulièrement l'objet de restaurations concrètes, les publications sur le sujet restent rares. L'impression 2D couleurs et l'impression 3D se partagent les cas d'études. En 2016, Lisa Metatla, alors élève restauratrice à l'Institut National du Patrimoine, a utilisé l'impression 2D couleurs pour recréer des motifs sur un tapis turc lacunaire [128]. Les motifs, périodiques, ont été complétés sur un logiciel de traitement d'images puis imprimés sur un tissu compatible. Des tests colorimétriques ont été effectués afin de trouver la couleur la plus proche. Le résultat est donné Figure C.1 6.



Figure C.1 6 – Exemple de restitution par impression 2D couleurs. A gauche, le tapis dans son état avant restauration. A droite, le tapis après restitution : la lacune imprimée reste légèrement visible, conformément à la déontologie de la restauration. Image : L. Metatla [128].

Plus récemment, Mattia Mercante a présenté plusieurs cas de restaurations effectuées à l'aide de l'impression 3D à l'Office des Pierres Dures de Florence. La première consiste en la réintégration des bouts des doigts d'une statue funéraire (Figure C.1 7). La technologie d'impression utilisée est détectable sous rayonnement UV, ce qui satisfait aux critères de lisibilité. Les fragments de doigts ont été placés à l'aide d'aimants : l'ajout est donc réversible. Lors de la seconde restauration, des éléments de décor mobilier ont été recréés, peints et dorés, puis réintégrés à l'objet initial (Figure C.1 8).

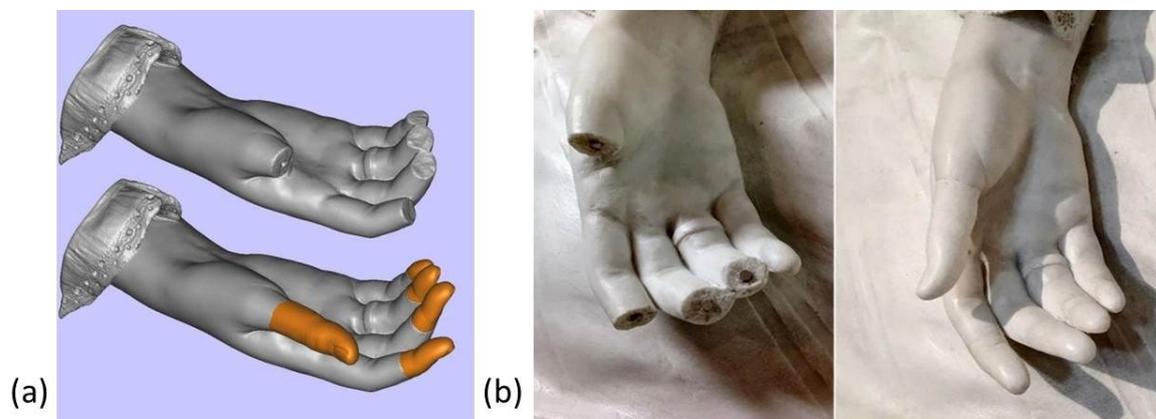


Figure C.1 7 – Exemple de restitution par impression 3D peinte et patinée par le restaurateur Matia Mercante. Image : fr.ubergizmo.com.

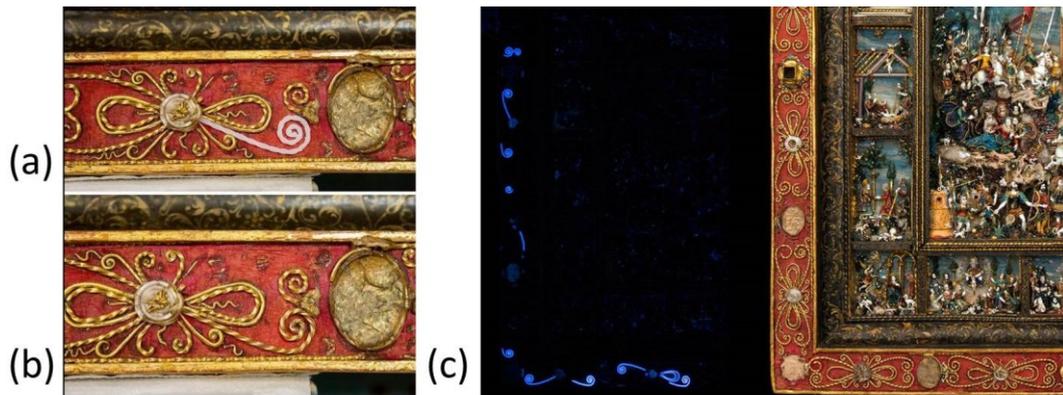


Figure C.1 8 – Exemple de restitution par impression 3D sur du mobilier. (a) Comblement 3D, peint en (b). (c) Vue du cadre sous UV et sous lumière visible. Les compléments sont clairement lisibles sous UV. Images : fr.ubergizmo.com et formlabs.com/it.

### 1.3.3 Intérêt de l'impression 2.5D

La bibliographie ne comporte que des exemples de restitutions en impression 2D couleurs ou en impression 3D. Or chacun de ces deux procédés est à l'heure actuelle limité : l'impression couleurs ne donne aucun relief, et l'impression 3D ne reproduit que la forme de l'objet, et non son apparence totale. Aussi l'impression 2.5D constitue-t-elle une alternative intéressante, puisqu'elle permet la création d'une couche colorée mate ou brillante en semi-relief. L'unique limite devient le relief de l'objet à reproduire, puisque l'impression 2.5D ne permet pas la construction de formes rondes ou avec contre-dépouilles. Cependant, un large panel d'objets reste envisageable : au cours de ces trois ans d'étude, nous avons été frappés par la variété d'objets en bas-relief qui existent dans les musées. Nous en donnons quelques exemples ci-après.

- **Peinture** : si la peinture, du XV<sup>ème</sup> au XIX<sup>ème</sup> siècle, offre des surfaces majoritairement lisses (car recouvertes de vernis), nombreux sont les exemples de peintures en « semi-relief ». Van Gogh en est l'exemple le plus marquant, mais de nombreux peintres modernes et contemporains ont aussi créé du relief dans leurs toiles (ne serait-ce qu'en les laissant non vernies). La peinture médiévale présente également fréquemment des insertions en reliefs : plaques métalliques, couronnes travaillées, objets précieux incrustés (Figure C.1 9). Le pastel est aussi un art pictural qui crée un léger relief mat.

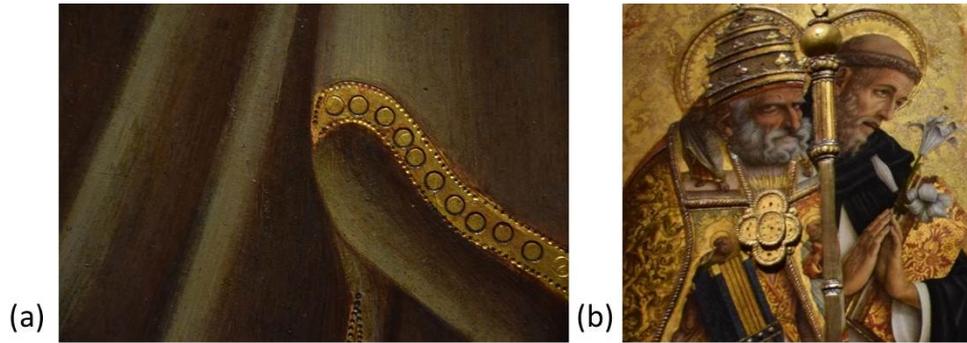


Figure C.1 9 – Deux exemples de relief incrusté en peinture. (a) Détail du manteau de Saint Paul, *Couronnement de la Vierge*, polyptique, huile sur bois, 1415, Andrea di Bartolo et Giorgio di Andrea, exposé à la Pinacothèque Bréra de Milan. (b) Détail (Saint-Pierre et Saint-Dominique) du *triptyque de Saint Dominique*, Carlo Crivelli, 1482-1483, tempera sur bois, exposé à la Pinacothèque Bréra de Milan. Images : M. Page, C2RMF, 2018.

- **Sculpture** : La première chose à mentionner est la variété de textures présentes sur les hauts-reliefs. Selon le matériau employé, l'époque et le sculpteur, l'aspect texturé de la matière varie fortement. Des exemples sont donnés Figure C.1 10 et Figure C.1 11.

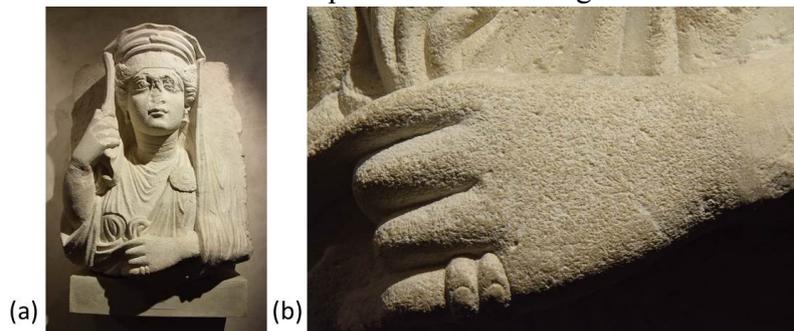


Figure C.1 10 – Un exemple de texture : (a) Pierre tombale d'une femme et (b) détail, II<sup>ème</sup> siècle après J.C, Palmyre, Syrie, collection du Fitzwilliam Museum, Cambridge. Images : M. Page, C2RMF, 2017.



Figure C.1 11 – Exemples de textures sur haut-relief. (a) Antoine Bourdelle, *Portrait de femme*, marbre, collection du Musée Bourdelle, Paris. (b) Antoine Bourdelle, *Sappho*, détail de la jupe, bronze, collection du Musée Bourdelle, Paris. Images : M. Page, C2RMF, 2017.

Les bas-reliefs présentent par définition un relief assez peu marqué. Epitaphes, stèles, bas-reliefs égyptiens, stucs, sont autant d'objets pour lesquels la technologie 2.5D est bien adaptée (Figure C.1 12). Ajoutons les objets sculptés de petit format, glyptique (taille, intaille, camées), sceaux, et tous les objets sculptés sur os ou ivoire, au fin relief. Enfin, les matériaux propres à la décoration (stucs, panneaux de bois, azulejos, etc.) présentent très souvent du semi-relief (Figure C.1 13).



Figure C.1 12 – Exemples de bas-reliefs. (a) Stèle funéraire du chef chambellan Ibi, Egypte, XII-XIII<sup>ème</sup> dynasties, 1994-1680 av. J-C, Florence, musée archéologique. (b) Gisant de Maria Vilalobos, détail, XIV<sup>ème</sup> siècle, cathédrale de Lisbonne. (c) Objet en ivoire sculpté, XIV-XV<sup>ème</sup> siècle, conservé au Bargello de Florence. Images : M. Page, C2RMF, 2018.

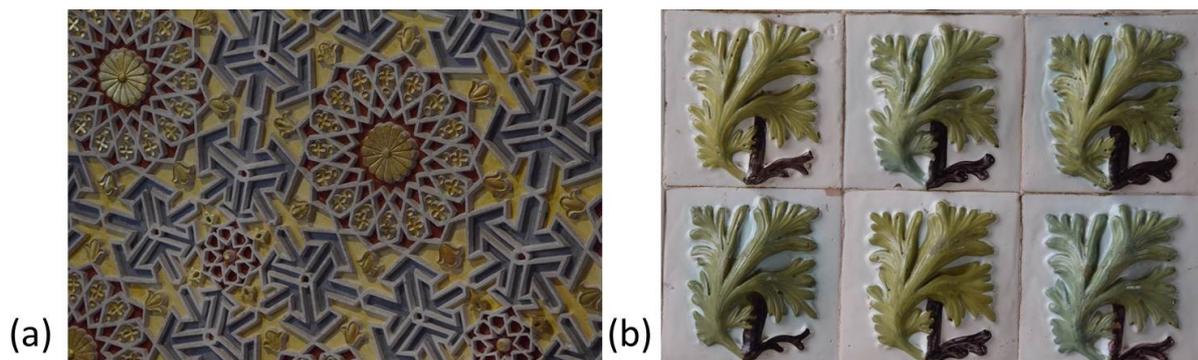


Figure C.1 13 – Exemples de décors en 2.5D, Palais de Pena, XIX<sup>ème</sup> siècle, Sintra. (a) Élément de décor intérieur en plâtre peint. (b) Élément de décor extérieur en céramique glaçurée (*azulejos*). Images : M. Page, C2RMF, 2017.

- **Gravure** : La gravure est une technique employée sur différents types de supports pour marquer un symbole, un texte ou une image. A partir du Moyen-Age, des planches gravées sont utilisées à des fins de reproduction. Ces planches sont en relief.

La xylographie, la lithographie, la linogravure, la taille douce, etc., sont autant de procédés qui emploient des supports en 2.5D.

- **Arts du feu** : l'orfèvrerie travaille très souvent les objets en bas-relief. Le repoussé, la ciselure, la granulation, le niellage, ou encore le champlevé sont autant de techniques qui créent un relief sur l'objet travaillé. L'argile est souvent gravée ou poinçonnée. Les céramiques présentent des décors gravés ou en relief. L'art du verre est également source d'objet en semi-relief (dont les vitraux sont un exemple).
- **Matériaux organiques** : Certains textiles tissés sont rugueux et se prêtent à la 2.5D (comme la laine). Des techniques différentes du tissage comme la broderie ou la dentelle créent des épaisseurs. Le cuir repoussé présente une surface en semi-relief. La corne, l'ivoire, l'os sont souvent travaillés en fine gravure.

En un mot, les exemples d'objets en semi-relief sont innombrables. Parmi tous ces objets, de nombreux sont mats. Sur le papier, la technologie d'impression 2.5D paraît donc adaptée à l'univers de la conservation-restauration du patrimoine. Mais nous allons voir à présent si le matériau employé lors de ce type d'impressions est compatible avec les règles de la restauration.

## 2. Compatibilité de l'impression 2.5D avec les critères de la restauration

### 2.1 Théorie de la restauration

Trois grands critères sous-tendent la pratique de la restauration actuelle en France: la **stabilité** des matériaux employés, la **réversibilité** de leur application, et la **lisibilité** de l'œuvre résultante. Tout ajout à un objet du patrimoine au cours d'une restauration doit satisfaire ces trois critères pour être acceptable. La stabilité des matériaux est primordiale : ainsi il serait par exemple impensable que les colles employées pour solidifier la structure d'un artefact archéologique aient un impact sur la matière originale. Tout ajout doit pouvoir être retiré, toute construction doit être démontable. Dès le XVIII<sup>ème</sup> siècle, période où une théorie de la restauration commence à s'ébaucher, François-Toussaint Hacquin, peintre et rentoileur, écrit :

« Attendu que nous sommes loin d'être infailibles, il est de la prudence de laisser à nos successeurs les moyens de remédier aux accidents que notre imprévoyance ou notre amour-propre pourroient occasionner. » [129, cité par 130]

Ce personnage est intéressant à de multiples égards. Sa pratique de la restauration est très moderne pour son époque : soucieux de stabilité des matériaux, et conscient de la nécessité de pouvoir « revenir en arrière » sur une restauration, il documente également en détails tous les cas qui lui ont été confiés. La « querelle des vernis » qui se tient à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle dans le milieu de la peinture est révélatrice des pensées de l'époque : Philip Hackert, un restaurateur éclairé, préconise l'emploi d'un vernis à base de térébenthine, réversible, et qui

vieillit mieux que l'usuel vernis à l'huile. Ses opposants soutiennent qu'un tel vernis, d'une nature différente de celle des composants des toiles, dénaturerait les œuvres. Et le débat va durer longtemps !

Au XIX<sup>ème</sup> siècle, l'architecte et théoricien Viollet-le-Duc insiste surtout sur la stabilité, à défaut de la réversibilité. Il préconise l'emploi lors des restaurations des mêmes matériaux que les matériaux d'origine, voire de matériaux de qualité supérieure si les originaux présentent des faiblesses [131]. Pour Viollet-le-Duc :

« Restaurer un édifice, ce n'est pas l'entretenir, le réparer ou le refaire, c'est le rétablir dans un état complet qui peut n'avoir jamais existé à un moment donné. » [131]

Viollet-le-Duc est ainsi l'apôtre de la **théorie de la réinvention**. Ces interventions, souvent critiquées aujourd'hui, ont eu le mérite de faire revivre certains sites majeurs, comme Carcassonne ou le château de Pierrefonds. A l'extrême opposé de Viollet-le-Duc, John Ruskin prône la non-restauration :

« Ce que l'on nomme restauration signifie la destruction la plus complète que puisse subir un édifice. » [132]

Pour Ruskin, toute restauration est à bannir : l'œuvre n'a de sens qu'à travers les modifications qu'elle a subi au cours du temps. La ruine est son état final, et l'authenticité étant le facteur primordial, il ne faut pas chercher à intervenir ! C'est un état d'esprit plus esthétique que réaliste, aussi ses propos ont-ils été tempérés par l'intellectuel Camillo Boito. Boito insiste sur le fait que la restauration doit permettre la conservation des œuvres, tout comme le respect de leur authenticité. Par conséquent, la consolidation moderne doit se distinguer de l'objet ancien : Boito préconise l'emploi de matériaux d'aspect différents, et l'ajout d'inscriptions ou plaques explicatives de l'intervention. Le critère de lisibilité apparaît, illustré ici par les Figure C.1 14 et Figure C.1 15. Il regroupe aujourd'hui deux notions :

- Comment lire l'œuvre originale ? En particulier, si l'œuvre a été fortement modifiée au fil des siècles, faut-il dé-restaurer pour retrouver l'état originel ?
- L'autre point concerne la lisibilité des interventions de restauration modernes. Ce point est majeur : la restauration n'est pas la création d'un faux !

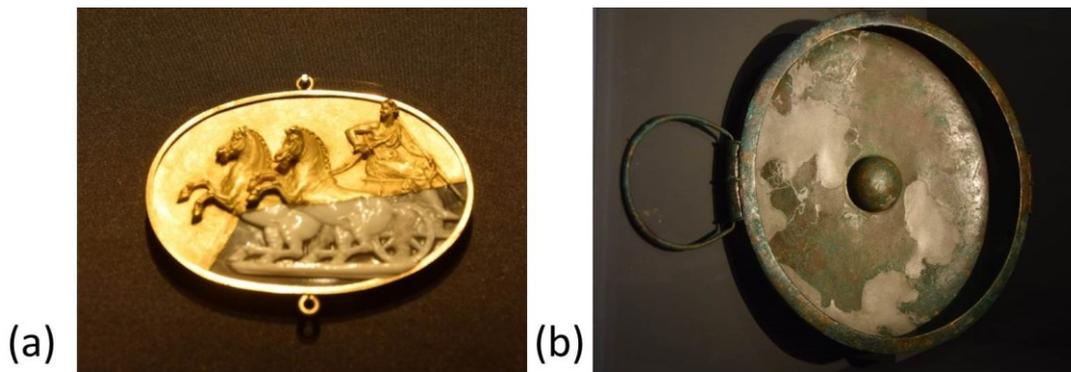


Figure C.1 14 – Exemples de restauration. (a) Restauration ancienne. Camée en calcédoine, période hellénistique (323-30 av. J-C). La partie supérieure, en or, est une restauration effectuée au XVI<sup>ème</sup> siècle par Benvenuto Cellini. Musée archéologique de Florence. (b) Restauration moderne. Coupe en bronze, en provenance de Populonia (Livourne), VII-VI<sup>ème</sup> siècle av. J-C. Musée archéologique de Florence. Images : M. Page, C2RMF, 2018.

Aujourd'hui, c'est le texte majeur *Théorie de la Restauration* de Cesare Brandi [133] qui fait office de philosophie de la restauration. Brandi détaille les trois principes : lisibilité, stabilité et réversibilité. Il souligne que la restauration doit sauver l'œuvre au moment où on la considère, et également faciliter les éventuelles restaurations futures : l'œuvre est faite pour durer. En pratique, les restaurateurs doivent faire un choix : entre ce qu'il est possible de faire sur une œuvre pour la conserver et ce qu'il vaut mieux faire, du point de vue de la philosophie de la restauration. La responsabilité du restaurateur et celle du responsable de collection, qui décide de l'intervention à réaliser, entrent en jeu :

« It is a challenge to the restorer's sense of responsibility to decide how much of what it is possible to do through science and technology should in fact be used and done. In a philosophy of abstinence there is scope for placing what is feasible at a subsidiary level and ones own attitude under higher aspects.» [134]

Soulignons que la notion de réversibilité pose problème. Elle suppose en effet que toute action effectuée sur l'œuvre soit complètement ôtable, ce qui en pratique n'est pas toujours possible. Les restaurateurs lui préfèrent donc maintenant selon les cas les termes de **retraitabilité** – toute intervention future doit rester possible – ou d'**amovibilité** – le matériau ajouté doit pouvoir être ôté [135].

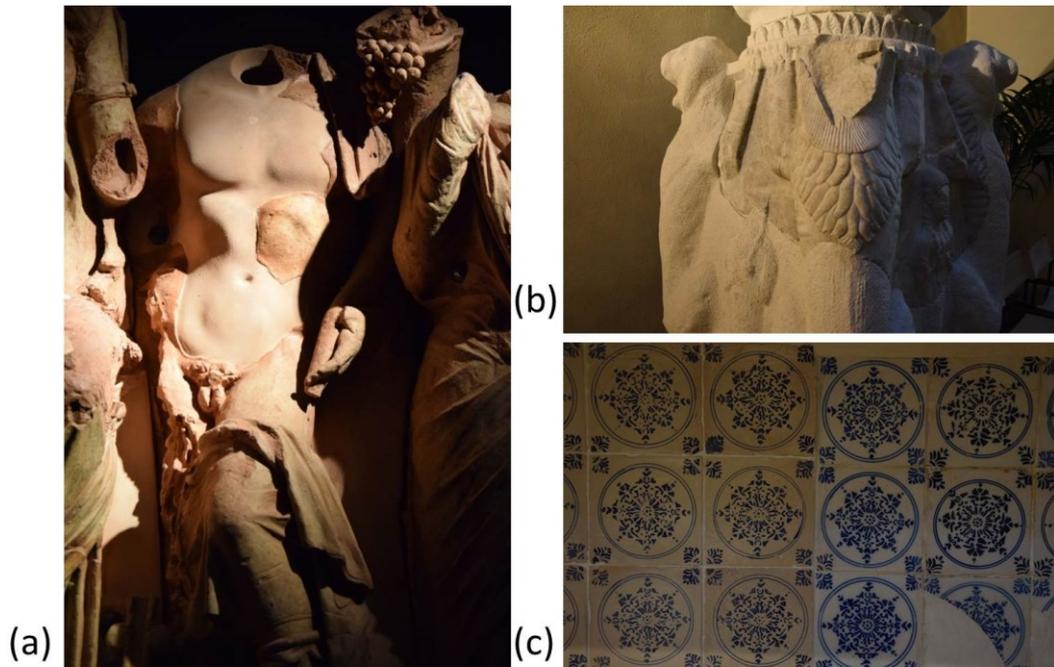


Figure C.1 15 – Exemples de restaurations modernes. (a) Statue antique. Les fragments originaux ont été intégrés dans un buste en résine pour créer une reconstitution cohérente et compréhensible. Partie du fronton d'un temple de Diane, probablement Dionysos, II<sup>ème</sup> siècle av. J-C, musée archéologique, Florence. (b) Bas-relief funéraire en marbre, trouvé à La Figuetta, près de Pise. La partie originale en marbre se distingue des comblements en argile, plus clairs. IV-III<sup>ème</sup> siècle av. J-C, musée archéologique, Florence. (c) Décors en céramique, originaux à droite et reconstitution plus sombre à gauche. Cuisine du Palais Pitti, Florence.

Images : M. Page, C2RMF, 2018.

## 2.2 Quel statut pour une impression 2.5D ?

Créer un comblement dans une matière plastique avec une technologie d'impression en relief est tout de même une démarche qui peut poser problème. S'agit-il d'ailleurs vraiment d'une restauration, au sens propre du terme ? N'est-ce pas plutôt une réinvention, ou une recreation ? La réinvention est le parti de Viollet-le-Duc, aujourd'hui largement dépassé, qui consiste à rétablir l'objet dans un état qu'il peut n'avoir jamais connu. En imprimant une lacune, on réinvente de la matière en supposant que si la lacune n'avait pas existé, l'objet aurait telle allure : supposition qui peut être parfaitement infondée. Toutefois, nous limitons l'application de la technologie d'impression 2.5D à des cas simples : petites lacunes, motifs élémentaires ou périodiques, aspects de surface uniformes. Qualifier de réinvention notre intervention paraît donc exagéré. Peut-on alors parler de recreation ? Par recreation, nous entendons non pas la réinvention totale d'un objet, mais la création locale d'une partie de l'œuvre.

Le cas de restauration qui nous occupera dans le chapitre suivant appartient au domaine précis de l'archéologie. La raison majeure pour effectuer un comblement est d'ordre structurel : un comblement est avant tout une consolidation. Sans comblements, l'objet ne peut parfois pas être présenté : sa structure lacunaire empêchant la tenue de l'œuvre ou sa compréhension. A l'exception de certains cas (comme les vases grecs peints) où l'esthétique entre en jeu, le caractère artistique des objets archéologiques ne prime pas. Les questions liées

au comblement sont donc nettement différentes de celles qui occupent les conservateurs et restaurateurs en art pictural (peinture ou graphique). La recreation d'un morceau d'objet archéologique parait en effet beaucoup moins choquante que celle qu'on pourrait imaginer sur un artefact graphique. Les termes **restitution** ou **reconstitution** paraissent peut-être plus adaptés. Le comblement d'une lacune, dans le cas archéologique, est une tentative pour rétablir l'objet dans un état qui facilite sa lecture et sa compréhension.

Un autre point à souligner est qu'en aucun cas le comblement de lacune ne doit faire disparaître la notion du temps qui s'est écoulé entre le moment de la création de l'œuvre et le moment de sa restauration. Cesare Brandi nomme cela une « restauration de restitution » et s'y oppose fermement. Combler la lacune d'un objet n'a pas pour but de masquer les modifications ou dégâts subis au cours du temps ; nous souhaitons uniquement faciliter la lecture de l'œuvre dans les cas où un comblement est nécessaire pour des raisons structurelles.

### **2.3 Impression 2.5D et critères de la restauration**

Voyons à présent si les encres employées lors d'une impression 2.5D valident les principes de la restauration que nous venons de présenter.

#### **2.3.1 Stabilité**

Afin de répondre à la question de la stabilité, plusieurs questions doivent être envisagées :

- Quel matériau forme les encres employées lors d'une impression 2.5D ?
- Ces matériaux sont-ils compatibles avec les colles utilisées pour un comblement ou une reconstruction ?
- Comment ces matériaux vieillissent-ils ? En particulier, se détériorent-ils sous rayonnement UV prolongé ?

##### *2.3.1.1 Composition des encres*

Le procédé d'impression 2.5D utilise des encres qui sèchent sous UV. Ces encres sont formées par un polymère plastique, auquel sont ajoutés des pigments, de taille inférieure au micromètre, qui lui donnent leurs teintes. Pour tenter de préciser la composition de la charge minérale et la nature du polymère, nous avons réalisé deux études rapides :

- L'analyse sous faisceau d'ions de chacune des encres (cyan, magenta, jaune, noir, blanc, vernis) sur l'accélérateur de particules grand Louvre (Aglaé) du C2RMF, avec Quentin Lemasson ;
- L'analyse en spectroscopie infrarouge de chacune des encres sur l'instrument de l'Institut national du patrimoine, réalisée par Lucile Brunel (Université de Cergy Pontoise / C2RMF).

L'analyse élémentaire a été effectuée pour caractériser les charges minérales présentes dans les encres. Elle a révélé différents éléments : certains sont présents dans les 5 encres colorées (soufre, phosphore, brome) et sont donc liés au polymère ; d'autres sont caractéristiques des pigments. Le phosphore est utilisé comme photoamorceur, il déclenche la réaction de

polymérisation. Le spectre de l'encre blanche présente ainsi un pic très net sur le titane : le blanc de titane est un pigment très utilisé. La présence du cuivre est attestée dans l'encre cyan, ce qui n'est pas étonnant, les bleus pouvant être des pigments au cuivre. Rien de notable n'apparaît sur les autres encres. Le magenta, qui est probablement un colorant organique, reste invisible en analyse élémentaire. De même pour le noir, qui est peut-être un noir de carbone, organique. Notons que le brome et le phosphore ont disparu du spectre du vernis. Peut-être le brome est-il ajouté aux encres colorées comme opacifiant. L'analyse ne permet pas d'aller plus loin.

L'analyse infrarouge a été effectuée avec un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier<sup>10</sup>. 16 scans ont été collectés dans la région 4000-380 cm<sup>-1</sup> avec une résolution spectrale de 4 cm<sup>-1</sup> pour chacun des spectres. Les spectres infrarouges réalisés sur l'ensemble des encres ont tous sensiblement la même allure, donnée Figure C.1 16, caractéristique d'un polymère. Ces spectres sont semblables à ceux des **copolymères styrènes-acryliques**, d'ailleurs employés comme liants dans l'industrie de l'impression [136, 137] ; il est donc tout à fait probable que ce plastique forme la base dure de nos encres.

Notons que dans le cadre d'un comblement de lacune, l'encre ne sera pas en contact direct avec l'artefact : la colle fera tampon. La question devient donc : encre et colle feront-elles bon ménage ?

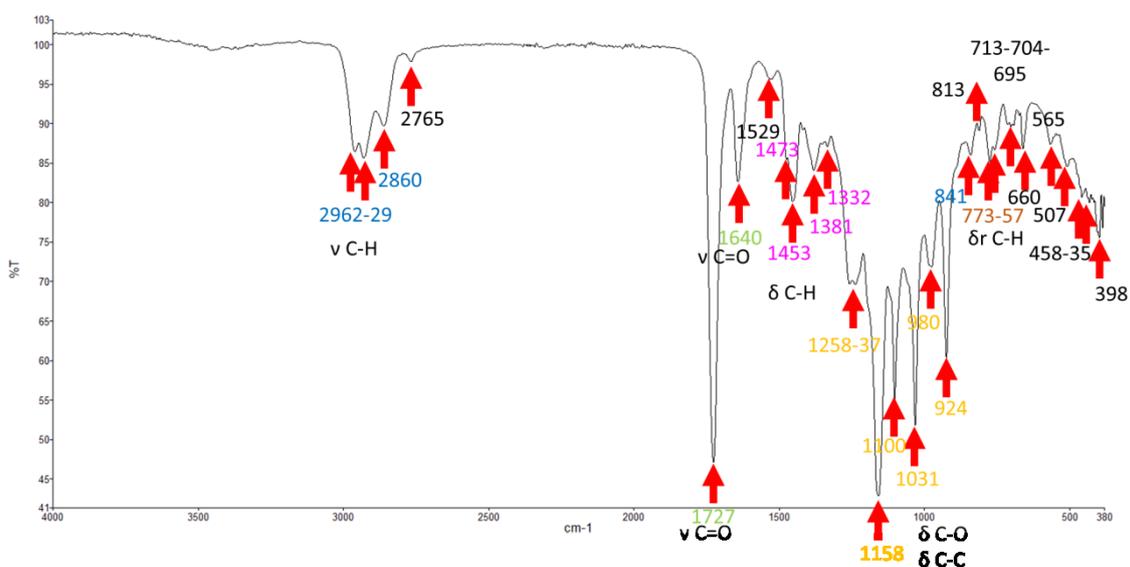


Figure C.1 16 – Spectre infrarouge et identification des bandes de transmission effectuée sur l'échantillon d'encre blanche. La transmission (en %) est tracée en fonction du nombre d'onde (en cm<sup>-1</sup>). Spectre effectuée sous spectromètre infrarouge à transformée de Fourier. Etude réalisée par Lucile Brunel-Duverger, Université de Cergy-Pontoise / C2RMF.

### 2.3.1.2 Compatibilité avec les colles

Shéhérazade Bentouati, restauratrice spécialisée dans les Arts du Métal, a effectué un test de compatibilité des imprimés 2.5D avec trois types de colles utilisées en restauration en insérant

<sup>10</sup>Spectromètre Perkin Elmer. Les analyses sont faites avec une cellule diamant.

simplement un morceau d'imprimé dans un tube contenant de la colle. La colle consiste en une poudre mélangée à un solvant. Trois solvants ont été testés : le WS D40 (White Spirit), l'acétone et l'éthanol. Une semaine après l'insertion des imprimés dans les colles, aucune coloration du solvant n'était notée. Quatre mois plus tard, rien n'avait changé.

### 2.3.1.3 Vieillesse

Plusieurs échantillons monochromatiques imprimés à différentes épaisseurs ont été placés dans l'enceinte de vieillissement sous UV située dans les ateliers de restauration ébénisterie, au pavillon de Flore. Visuellement, après deux semaines sous UV, aucune différence n'était perceptible. Le test de vieillissement demande à être poursuivi et validé par des mesures au spectromètre.

### 2.3.2 Réversibilité

Les cas de restaurations que nous proposerons seront uniquement des cas de réintégrations de lacunes. Ceux-ci présupposent l'utilisation de colles connues et adaptées aux matériaux anciens. En conséquence, la lacune peut être supprimée si la colle est soluble.

### 2.3.3 Lisibilité

Enfin, la question de la lisibilité est à résoudre. L'intérêt de la technologie 2.5D est qu'on peut recréer une apparence similaire à celle de l'objet original. Toutefois, pour satisfaire aux principes de la restauration, quelque chose doit rendre visible le comblement. Plusieurs solutions s'offrent à nous :

- Créer une surface au recto d'apparence très similaire à l'objet considéré, et au verso nettement différent : le comblement sera alors visible en tournant autour de l'objet. Cette solution peut être envisagée selon les conditions d'exposition des pièces. Ce type de restauration est prisé par les musées et les grands collectionneurs.
- Décaler légèrement la couleur de la lacune pour que celle-ci soit détectable. Dans ce cas, l'impression 2.5D perd légèrement de son intérêt vis-à-vis d'une restauration « traditionnelle ».
- Modifier légèrement le brillant de la lacune pour que celle-ci soit détectable. La couleur est alors similaire, mais selon la distance et l'angle d'observation, des effets de brillants permettent de détecter l'ajout. En particulier, le scintillement des encres, observé à courte distance, pourrait être exploité pour distinguer le comblement de la matière originale.

Notons qu'en plus de la lisibilité éthique du comblement, la lisibilité de l'œuvre est en jeu. Créer un comblement d'apparence très proche de celle de l'objet peut être considéré comme un moyen pour rendre une œuvre lisible.

## 3. Démarche : de l'objet à l'imprimé

Pour tous les cas d'étude considérés, nous suivons un protocole similaire en deux grandes étapes : l'acquisition des paramètres d'apparence de l'objet, et leur reproduction par impression selon la stratégie la plus adaptée.

### 3.1 Acquisition des paramètres d'apparence

La première étape est l'acquisition des paramètres d'apparence : forme, couleur, brillant (Figure C.1 17). L'acquisition de la **forme** est faite soit au moyen d'un scanner 3D, soit par microtopographie. Ces deux méthodes peuvent être mises en place au C2RMF ; le scanner 3D tout comme la station de microtopographie sont mobiles, ce qui permet d'envisager des acquisitions in-situ. Le **scanner 3D** du C2RMF est un scanner à lumière structurée, le smartSCAN<sup>3D</sup>-HE<sup>TM</sup> de Breuckmann<sup>TM</sup>. Nous avons systématiquement utilisé les objectifs S-060, qui permettent de faire l'acquisition successive de plusieurs zones de 48 × 36 mm avec une bonne résolution (20 µm en X, Y et 1 µm en Z [138]), l'objet subissant une rotation ou un décalage latéral entre chaque prise de vue<sup>11</sup>. L'ensemble des acquisitions est ensuite reconstruit au moyen du logiciel fourni par Breuckmann<sup>TM</sup>. La **station de microtopographie** consiste en une sonde non-invasive qui vient scanner la surface de l'objet, à une échelle très fine (reliefs allant de quelques microns à 8 mm). Son principe précis a été donné au chapitre A.2.

Deux moyens existent pour faire l'acquisition de la **couleur**. Le premier consiste en la mesure des paramètres colorimétriques en chaque partie de l'objet au moyen d'un spectromètre. Cette méthode est très fiable mais complexe à mettre en pratique sur des objets polychromes. Le second moyen consiste en la prise de vues de photographies couleur calibrées. Pour ce faire, une charte couleur est placée à côté de l'objet lors de la prise de vue. Cette charte est utilisée sur Photoshop pour contrôler les valeurs colorimétriques. La photographie ainsi réalisée est colorimétriquement fiable, mais a l'inconvénient de présenter des ombrages dus à l'éclairage [139].

Enfin, le **brillant** spéculaire est acquis par mesure avec contact au brillance-mètre lorsque cela est possible, et par mesure des paramètres de rugosité sans contact, avec la station de microtopographie, lorsque tout contact est à proscrire.

---

<sup>11</sup> Le constructeur précise que l'erreur en Z est de l'ordre de  $\pm 2$  µm, tandis que l'erreur systématique est estimée à  $\pm 7$  µm.



Figure C.1 17 – Paramètres d’apparence d’un objet réel. Ici Donatello, *La Nativité*, XVI<sup>ème</sup> siècle, bas-relief polychromé, 770X755cm, Musée du Louvre.

### 3.2 Choix de la bonne stratégie d’impression

Lors de l’impression en relief, les différentes informations d’apparence vont être successivement prises en compte pour former un objet ressemblant. La superposition des couches d’encre est illustrée par la Figure C.1 18.

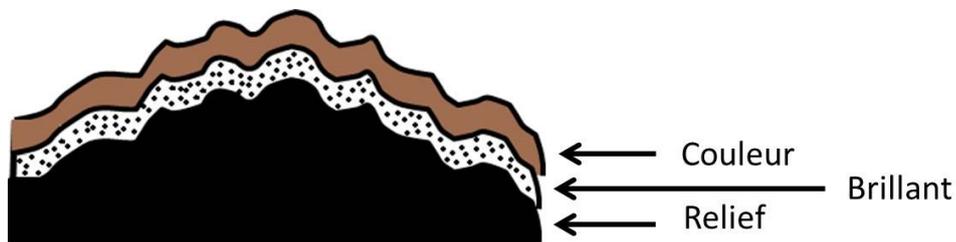


Figure C.1 18 – Impression en relief. Plusieurs couches d’encre sont superposées pour former l’objet. Le corps de l’imprimé forme le relief global de l’objet, sa forme. Au-dessus, une couche d’encre blanche est modulée pour donner la sensation de brillant. Lui est ajoutée une dernière couche qui contient l’information couleur.

Le relief ne pose pas de problème, il est assez simplement déduit du scan 3D effectué puis imprimé grâce à un rapide programme sur le logiciel de rendu 3D Blender™. Par contre, les deux couches qui contiennent respectivement l’information en brillant et celle en couleur doivent être soigneusement construites pour que l’objet final soit le plus réaliste possible.

### 3.2.1 Brillant

Comment imprimer « le bon brillant » ? Nous avons vu dans la Partie B de ce manuscrit que les variations de brillant étaient gérées par la création de couches rugueuses contrôlées. Les graphes qui suivent placent des surfaces réelles auprès des surfaces imprimées dans la Partie B, afin de mettre en relation impression et réalité.

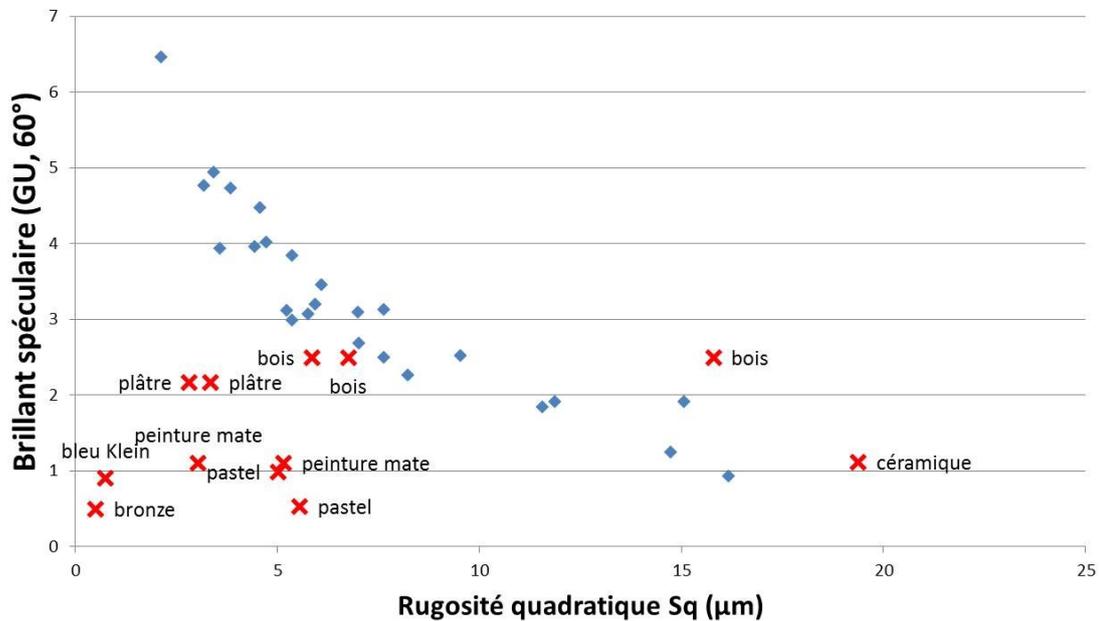


Figure C.1 19 – Rugosité quadratique  $S_q$  (en  $\mu\text{m}$ ) en fonction du brillant spéculaire mesuré à  $60^\circ$  (en Gloss Units).

Sur la Figure C.1 19 ont été placés quelques objets réels (bois, peinture ou bronze), en regard avec une série d'imprimés tests, figurés par des losanges bleus. Ces imprimés correspondent à différentes stratégies et différentes configurations, de rugosités et brillants variables. Ils correspondent aux possibilités de l'imprimante à l'état actuel. Si on les classe en fonction de leur brillant spéculaire et de leur rugosité quadratique (ce qui a été fait Figure C.1 19), on voit assez nettement que la plupart des objets réels se démarquent des imprimés : plâtre, bronze ou pastel ont une rugosité quadratique et un brillant plus faible que la majeure partie des stratégies d'impression. Cela est logique : nous savons que nous sommes limités dans la reproduction par la nature même des encres utilisées. Néanmoins, on peut noter que de nombreuses stratégies d'impression ont un brillant spéculaire qui correspond à celui des objets d'intérêt. La question demeure : quelle stratégie choisir ?

Nous l'avons dit à plusieurs reprises : un unique paramètre de rugosité ne suffit pas à décrire une surface. Nous choisissons de regarder également l'aplatissement (*kurtosis*,  $S_{ku}$ ), le facteur d'asymétrie (*skewness*,  $S_{sk}$ ) et la longueur d'autocorrélation  $S_{al}$ .

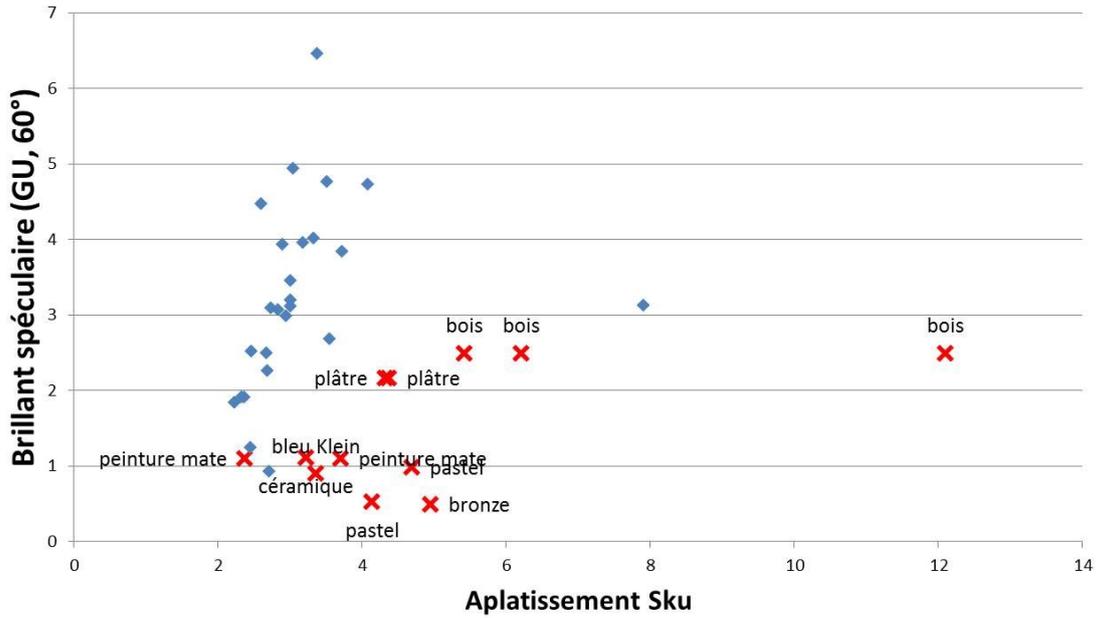


Figure C.1 20 – Facteur d’aplatissement  $S_{ku}$  (sans unité) en fonction du brillant spéculaire mesuré à  $60^\circ$  (en Gloss Units).

$S_{ku}$ , selon qu’il est supérieur ou non à la valeur 3, signale une surface composée de pics ( $S_{ku} > 3$ ) ou de bosses ( $S_{ku} < 3$ ). La Figure C.1 20 montre que la grande majorité des surfaces réelles ont un facteur d’aplatissement supérieur à 3, c’est-à-dire qu’elles présentent un relief assez net, pointu. Au contraire, de nombreuses stratégies d’impression ont un  $S_{ku}$  inférieur à 3 : leur relief est plus mou. Les stratégies au  $S_{ku}$  supérieur à 3 présentent un brillant trop élevé pour être réellement considérées.

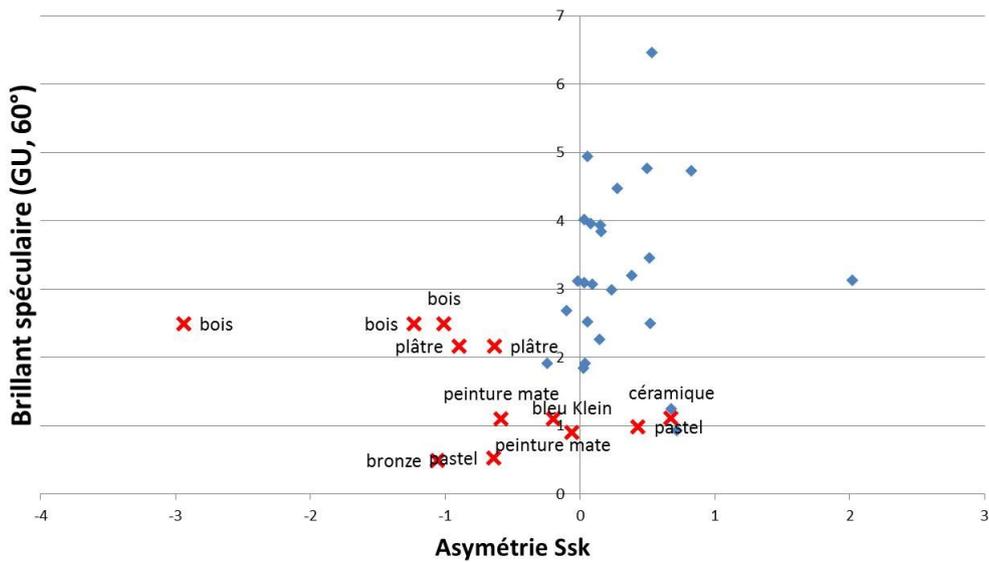


Figure C.1 21 – Facteur d’asymétrie  $S_{sk}$  (sans unité) en fonction du brillant spéculaire mesuré à  $60^\circ$  (en Gloss Units).

$S_{Sk}$ , s'il est négatif, indique que la surface présente des vallées profondes et fines. S'il est positif, il indique que la surface présente des pics sur un plan. A nouveau, de manière nette, on voit Figure C.1 21 que les surfaces réelles se classent du côté négatif (le profil est décalé : la surface est un plateau large ponctué de trous) tandis que les imprimés se classent du côté positif : ils sont en effet constitués de piliers sur un plan, ce qu'on voit clairement ici. Notons tout de même la proximité entre céramique, pastel, et stratégie « I\_100 » (voir Partie B pour sa définition).

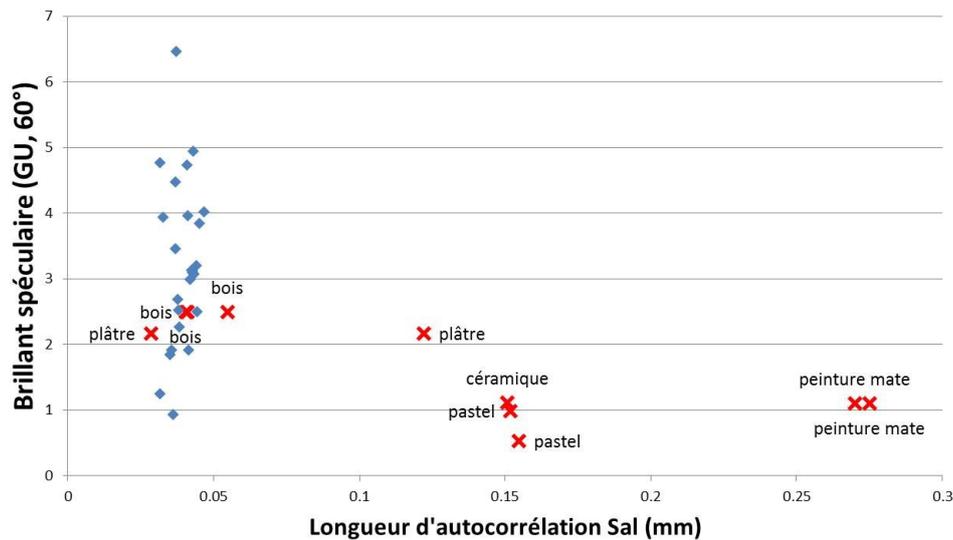


Figure C.1 22 – Longueur d'autocorrélation  $S_{al}$  (en mm) en fonction du brillant spéculaire mesuré à 60° (en Gloss Units).

Enfin, la longueur d'autocorrélation des imprimés présentée Figure C.1 22 est très proche de certaines surfaces, mais très différente d'autres. La seule analyse de ces paramètres, un à un, ne permet donc pas de conclure sur la stratégie d'impression à utiliser.

Pour trouver la stratégie d'impression la plus adaptée, nous choisissons de réunir l'ensemble des paramètres de rugosité et le brillant dans une Analyse par Composantes Principales (ACP). L'ACP est une méthode statistique de regroupement des données. Dans le cas de l'étude de surfaces, nous avons collecté de nombreuses informations : une douzaine de paramètres de rugosité différents, et le brillant spéculaire. L'ACP permet de faire la synthèse de toutes les données et idéalement, regrouperait les objets réels avec une ou plusieurs stratégies d'information. En entrée de l'ACP, on place nos objets réels et les stratégies d'impression. Les variables sont les paramètres de rugosité et le brillant. Notons qu'on pourrait tout aussi bien choisir comme variables un spectre de BRDF, ou une Densité Spectrale de Puissance issue de l'analyse de Fourier de nos profils de rugosité. L'analyse factorielle effectuée lors de l'ACP met en valeur des tendances, des axes principaux autour desquels l'information est réorganisée. La représentation graphique dans ce nouvel espace, formé par les axes principaux, permet les rapprochements entre les données. Nous avons effectué ce type d'analyse sur nos échantillons.

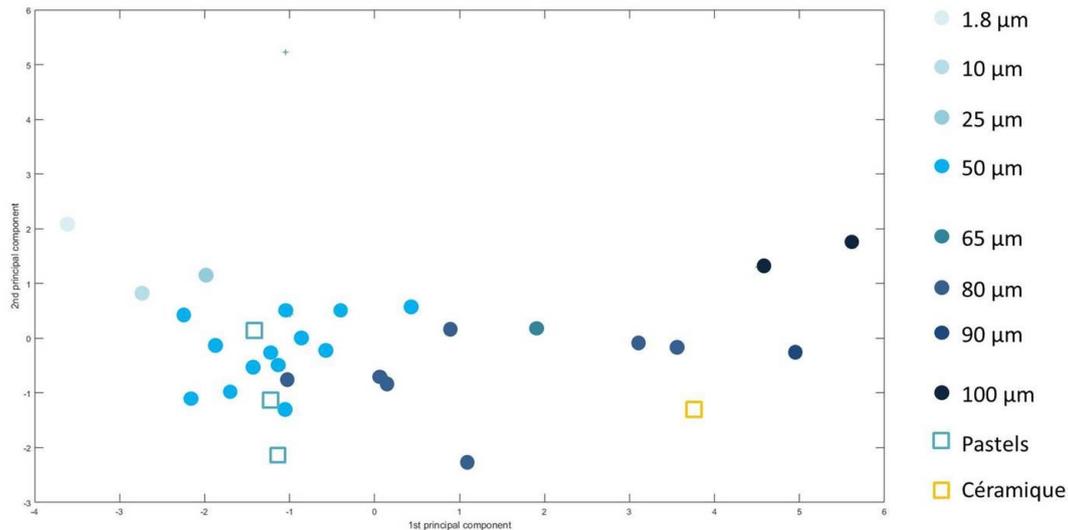


Figure C.1 23 – Analyse par composantes principales. Les points bleus représentent les différentes stratégies d’impression, données en fonction de la hauteur des piliers implémentés.

Ainsi, la Figure C.1 23 représente nos données dans un espace virtuel, une base formée par les composantes principales. On y reconnaît en fait facilement l’influence de la rugosité sur l’axe des abscisses : les points bleus, dont l’intensité est reliée à la rugosité (plus le bleu est sombre, plus la surface est rugueuse) s’échelonnent graduellement de gauche à droite. Dans cet espace où tous les paramètres sont pris en compte, on peut associer aux objets réels présents une configuration d’impression préférentielle : une configuration à 80 μm pour la céramique ; une configuration à 50 μm pour les pastels.

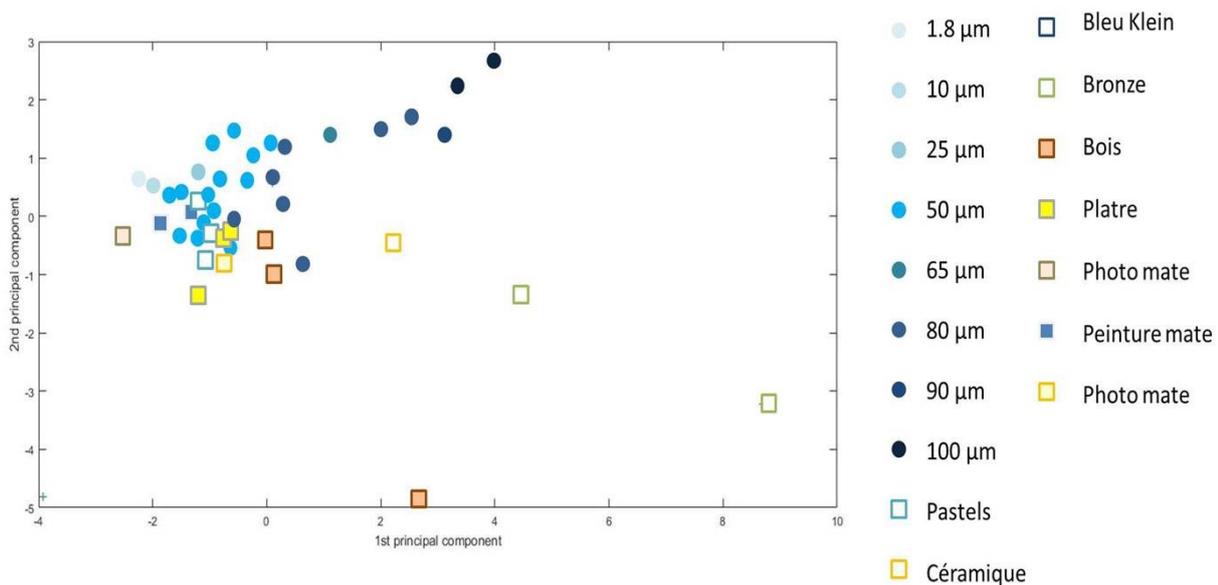


Figure C.1 24 – Analyse par composantes principales. Les points bleus représentent les différentes stratégies d’impression, données en fonction de la hauteur des piliers implémentés.

On note Figure C.1 24 que certains objets réels ne présentent pas de rapprochement avec les stratégies d’impression. A nouveau, nous sortons de la gamme des possibilités de

l'imprimante : le bronze par exemple n'est proche d'aucune configuration implémentée. Nous savons donc que le reproduire sera plus complexe voire impossible à l'heure actuelle (tout dépend de la qualité attendue).

### 3.2.2 Couleur

Face à un objet polychrome en relief, la couleur perçue est fonction des jeux d'ombre et de lumière à la surface. Lors de l'impression, on peut considérer que le microrelief ajouté entre la couche relief et la couche couleur n'a pas d'autre influence sur la couleur finale que celle étudiée dans le cadre du chapitre B.4 (influence compensée sur le brillant et influence gérée via profil ICC sur la couleur). En revanche, plaquer une photographie couleur – qui contient les ombres données par un certain éclairage ! – sur une structure en relief pose un nouveau problème. Pourtant, comme nous l'avons dit, la prise de vue est l'unique solution qui permette une visualisation et donc une reproduction de l'ensemble des couleurs de l'objet. La méthode illusionniste, qui consisterait à imprimer la couleur issue de la photographie sur un relief « plat » n'est pas toujours envisageable : le relief est en effet l'avantage majeur de la technologie 2.5D, il serait dommage de supprimer cet effet. Nous mentionnerons les solutions choisies en fonction des objets dans le chapitre suivant.

## 3.3 Critère de satisfaction

Enfin, une dernière question demeure : quand peut-on se déclarer satisfait de l'imprimé produit ? La mesure de la BRDF pour comparer l'apparence de l'imprimé à celle de l'objet original n'a pas de réel intérêt, puisque l'apparence est simulée plutôt que réellement reproduite. La mesure de la rugosité peut être un moyen de contrôler le relief produit (à grande échelle) ou l'aspect de brillant créé (à échelle faible). Le critère majeur reste la comparaison visuelle, à distance donnée (supérieure à 1 mètre) et sous éclairage fixe, par un professionnel de la restauration. On pourrait imaginer faire des tests sur grand public, sous cabine d'éclairage, en demandant de répondre à la question suivante : quel objet est l'original ? Faute de temps, on se contentera d'une évaluation par le restaurateur ou le conservateur concerné.

## 4. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre pourquoi nous souhaitons tester l'impression 2.5D (ou impression relief) dans le cadre précis des matériaux du patrimoine. Les matériaux constitutifs des encres semblent compatibles avec les critères de la restauration ; la démarche de reproduction de matériaux est justifiée, et la restitution de lacunes dans un cadre archéologique est envisageable selon les cas, bien que discutable. Enfin, nous avons présenté la démarche générale d'étude des objets en vue de leur impression. Il ne nous reste plus qu'à présenter les matériaux d'intérêt que nous avons sélectionné, et à discuter des études réalisées.

Dans le cadre de notre étude, nous nous limitons aux matériaux **mats** en **bas-relief**, qui ne présentent pas de contre-dépouilles. Nous rappelons que le bas-relief est imposé par le procédé même d'impression, et que l'aspect mat est dicté par notre sujet de recherche. Afin

d'explorer plusieurs pistes et de montrer que l'impression 2.5D peut trouver sa place dans le domaine du patrimoine, nous présenterons plusieurs cas d'étude :

- La reproduction 2.5D d'un matériau « simple », mat et de couleur unie : **le plâtre comme cas d'école.**
- La restauration par reproduction 2.5D d'un matériau complexe, mat et coloré : **les boutons de vêtements.**
- La restauration avec comblement 2.5D d'un matériau complexe, très rugueux, mat et coloré : **le bandage de roue en bronze.**
- La création de bas-reliefs mats et brillants en 2.5D à visée muséographique : **le bestiaire médiéval pour les malvoyants.**
- La création de répliques mates en 2.5D à visée pédagogique : **les matrices de sceaux.**

Ces cinq cas d'étude font l'objet du chapitre suivant.



## Chapitre C.2. Applications

Le dernier chapitre de notre manuscrit présente les cas d'application du procédé 2.5D sur lesquels nous avons travaillé. Plusieurs problématiques propres au domaine du patrimoine sont présentées : la reproduction d'objets à but de conservation, d'étude ou de restauration ; le comblement de lacunes ; la muséographie. Cinq cas d'étude sont abordés dans cette partie ; leur unique point commun est de concerner des matériaux **mats**. Le plâtre, matériau « simple », mat et de couleur uni, ouvre le chapitre avec l'exemple d'un objet en bas-relief. Suivent deux cas de restauration : un exemple textile avec les boutons de vêtements et un exemple archéologique avec les bandages de roue en bronze. Nous aborderons ensuite l'aspect pédagogique, avec les matrices de sceaux, et enfin l'aspect muséographique avec le bestiaire médiéval. Pour chaque exemple, nous détaillons la problématique, les institutions partenaires et le résultat obtenu grâce à nos protocoles d'impression. Nous discutons également de la pertinence de la technologie 2.5D par rapport à d'autres procédés.

## 1. Le plâtre comme cas d'école

Le plâtre est un matériau fabriqué à partir de gypse et d'eau, utilisé aussi bien en construction qu'en décoration, pour créer des moulages, des sculptures... Bon marché, stable dans le temps, le plâtre est omniprésent dans le domaine du patrimoine. Sa surface poreuse se prête volontiers à l'application d'une couche polychrome.

Nous avons choisi le plâtre comme premier cas d'étude car sa surface remplit tous nos critères :

- Le plâtre est extrêmement diffusant et donc totalement mat ;
- Les objets en plâtre sont fréquemment des bas-reliefs : décorations, moulures, stucs..., ce qui convient au procédé d'impression 2.5D ;
- Sa couleur naturellement blanche et unie permet de s'affranchir de la question de la calibration couleur.

L'objet choisi est une simple moulure achetée dans un magasin de bricolage. Sa surface présente un relief modéré. Nous faisons l'acquisition de sa forme avec le scanner 3D (Figure C.2 1).

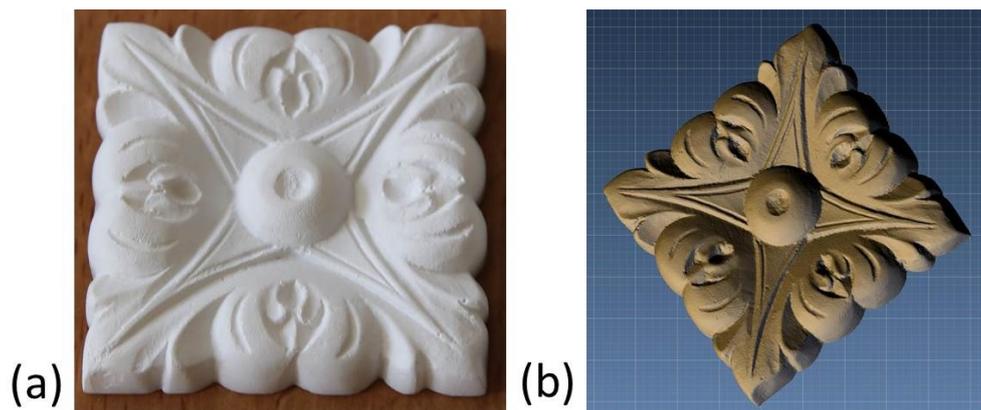


Figure C.2 1 – (a) Moulure originale en plâtre. (b) Résultat de la numérisation 3D de l'objet.

L'objectif de ce cas d'étude est de produire une surface mate. Pour cela, nous mesurons le brillant spéculaire au glossmètre de notre objet : 2.2 GU à 60°. L'analyse par composante principale effectuée au chapitre précédent rapproche le plâtre des configurations de hauteur 50  $\mu\text{m}$  et des configurations de hauteur 80  $\mu\text{m}$ . Nous choisissons la configuration I : le but est en effet ici de produire une surface qui crée une sensation visuelle mate, et I a montré dans la Partie B qu'il était le plus satisfaisant des motifs implémentés. Pour obtenir un brillant à 2.2 GU, l'abaque de la configuration I nous donne :

$$h = \exp\left(\frac{1}{2.4189}(12.6431 - g)\right) = 75 \mu\text{m}$$

avec  $g = 2.2 \text{ GU}$ . L'impression est réalisée en superposant les piliers I à la hauteur de 75  $\mu\text{m}$  sur les couches formant le relief, selon les Figure C.2 2 et Figure C.2 3.

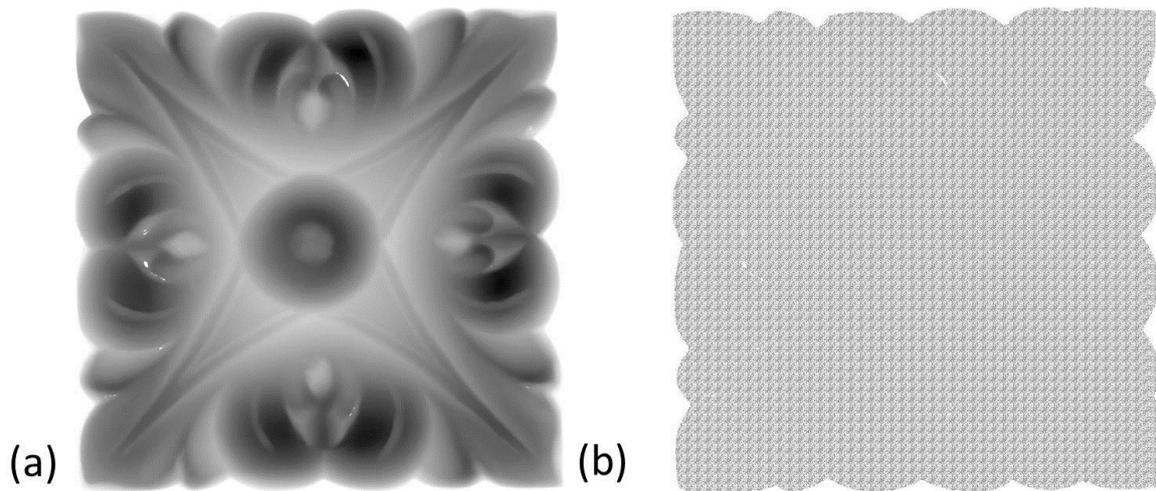


Figure C.2 2 – Fichiers utilisés pour l’impression, imprimés en encre blanche. (a) Fichier contenant l’information sur la forme : plus l’image est sombre, plus le relief est élevé. (b) Fichier contenant l’information sur le brillant : motif régulier I.



Figure C.2 3 – Impression en relief. L’ensemble est réalisé uniquement en encre blanche, ce qui nous évite la couche couleur finale. Le relief est formé d’encre suivant l’image (a) de la Figure C.2 2, et le brillant selon l’image (b) de la même figure.

Le résultat final est un objet de même taille, aux formes légèrement émoussées par le procédé d’impression (voir la Figure C.2 4). La couleur est un peu plus jaune, ce qui est causé par l’empilement de couches d’encre, à la différence de l’objet original qui était d’un blanc tirant sur le bleu. A une certaine distance (supérieure à 30 cm), la différence en brillant est très subtile, presque imperceptible. En s’approchant à moins de 15 cm, l’œil aperçoit une fine texture, qui est causée par les trames du motif I. Il faut tourner et orienter l’objet, à courte distance (inférieure à 20 cm), pour percevoir une sensation satinée sur l’échantillon imprimé, tandis que l’original reste uniformément mat.

La hauteur des piliers donnée par l’algorithme semble un bon choix ; l’imprimé résultant crée en effet la sensation mate recherchée. Placé à côté d’un imprimé classique, sans micro-structure, la différence est assez nette : l’imprimé normal brille plus. Sur les zones plates du bas-relief, cela est encore plus sensible, comme le montre la Figure C.2 5.



Figure C.2 4 – De gauche à droite : imprimé mat à piliers, objet original, et imprimé sans piliers.



Figure C.2 5 – Imprimé mat placé sur l'imprimé plus brillant. Sous cet éclairage, même si cela n'est pas idéalement rendu par la photographie, on voit la différence entre les reflets brillants de l'imprimé normal, signalés par la flèche verte, qui sont absent de l'imprimé à micro-structure, signalé par la flèche bleue.

Pour aller plus loin, nous envisageons éventuellement d'imprimer la reproduction d'un bas-relief en plâtre de la Renaissance, dans le cadre du projet ESPRIT (Etude des Stucs Polychrômes de la Renaissance Italienne), en collaboration avec Gianluca Gariani, Léa Jacquelin et Anne Bouquillon du C2RMF.

## 2. Les boutons de vêtements

### 2.1 Genèse du projet

Le projet « Bouton » est né de ma rencontre avec Sylvie Brun, restauratrice textile du Palais Galliera, par l'intermédiaire de Gilles Bastian, conservateur peintures au C2RMF. J'avais pensé que les textiles anciens, qui sont souvent en relief et très mats de par leur structure altérée, auraient pu faire un bon sujet d'étude pour l'impression 2.5D. Mais la restauration textile exige un support souple, qui puisse être cousu (ce qui n'est pas un souci si l'impression relief se fait elle-même sur un textile) mais surtout, qui supporte des contraintes mécaniques importantes. En effet selon le support textile choisi – c'est le cas en particuliers des tapis ou des tentures – l'objet peut être roulé pour des questions de transport ou de conservation. Dans le cas des textiles, le matériau de comblement doit également pouvoir supporter des contraintes fortes selon l'endroit où il est situé. En conséquence, l'impression relief (2.5D ou 3D en règle générale), rigide, n'est pas adaptée à ce type d'objets. En revanche, les accessoires, qui présentent aussi une large gamme d'aspects de surfaces, semblent plus pertinents. Parmi les accessoires de couture, la restauratrice a sélectionné le **bouton**.

### 2.2 Le bouton

#### 2.2.1 Définition et histoire

Les boutons sont des accessoires variés, dont le matériau, la texture, la couleur et le brillant changent du tout au tout selon les époques, et, à partir du XX<sup>ème</sup> siècle, selon le couturier. Il s'agit d'un petit objet, souvent rond, qui sert d'attache en couture et permet de retenir deux parties d'un vêtement ou d'un accessoire. Il peut être de différentes matières (métal, bois, faïence, plastique...), plat ou bombé. Il est passé dans une boutonnière, une ganse ou une bride. Des objets extrêmement anciens ressemblant à des boutons ont été retrouvés en Iran ou en Grèce, mais il n'y a aucune preuve que ces pièces aient été utilisées comme attache de vêtement. Peut-être servaient-elles plutôt de sceau ou de simple ornementation. Pendant l'Antiquité et le haut Moyen-Age, c'est la fibule qui fait office d'attache (raison pour laquelle les actuels collectionneurs de boutons sont appelés « fibulanomistes »). Le bouton dans le costume, sous sa forme actuelle d'attache décorative, apparaît au XII<sup>ème</sup> siècle en Occident. Au XIII<sup>ème</sup> siècle en France, il est attesté que les corporations de boutonniers sont inscrites au registre des métiers. Les boutons en métal sont fabriqués par les boutonniers, ceux en os ou en ivoire par les tabletiers, et ceux en verre ou en pierres précieuses par les orfèvres [140, 141].

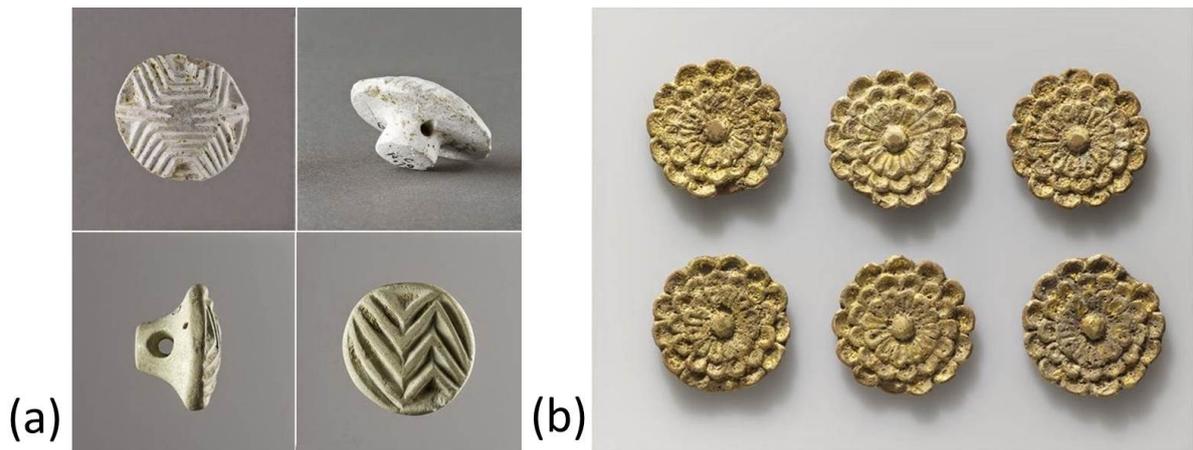


Figure C.2 6 – Exemples de boutons anciens. (a) « Cachets boutons », peut-être un ancêtre du sceau, décor géométrique. En haut : terre cuite, site de Tepe Giyan, Iran, 4<sup>ème</sup> millénaire av. J.-C. En bas : pierre, site de Tepe Sialk, Iran, 4<sup>ème</sup> millénaire av. J.-C. Musée du Louvre. (b) Boutons ornementaux en argile, site de Kavakli, Grèce, 330-300 av. J.-C. Musée du Louvre. Images : les8petites8mains.blogspot.com.

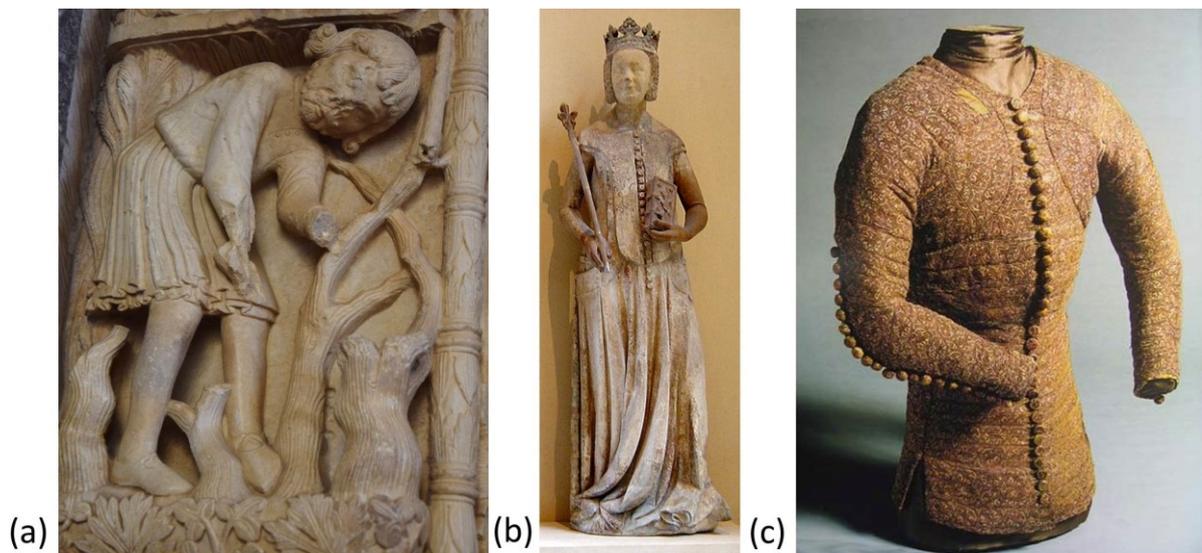


Figure C.2 7 – Trois exemples médiévaux. (a) Paysan en tunique boutonnée sur la poitrine et chausses et poulaines. Portail de la cathédrale de Trogir, œuvre de Radovan, XIII<sup>ème</sup> siècle. Image : M. Page, C2RMF, 2018. (b) Cotte et surcot ouvert orné de boutons décoratifs. Jeanne de Bourbon, portail des Célestins, 1365-1370, Musée du Louvre. Image : wikiwand.fr. (c) Célèbre pourpoint boutonné de Charles de Blois, aux 32 pièces assemblées et fermées par 32 boutons. Milieu du XIV<sup>ème</sup> siècle, soie, lampas et fils d'or. Collection du musée des tissus de Lyon. Image : les8petites8mains.blogspot.com.

Au siècle suivant, lorsque la mode passe aux vêtements ajustés, après des siècles de coupes amples, et que vêtements féminins et masculins se distinguent, le bouton acquiert un nouveau statut : d'ornementation, il devient attache primordiale sur tous les vêtements du quotidien. On notera que le bouton est considéré comme un accessoire de luxe, comme un bijou : plusieurs lois somptuaires s'attacheront d'ailleurs à limiter le nombre de boutons en or, argent

ou perles qu'un noble peut porter sur un même vêtement. François I<sup>er</sup> porte en 1520 lors de sa rencontre avec Henri VIII d'Angleterre un habit de velours noir orné de 13 400 boutons précieux [140] ! Deux siècles plus tard, Louis XIV accueille l'ambassadeur de Perse Mehemet Raza-Bey et revêt pour l'occasion un vêtement orné de boutons en diamant, pour lequel il a déboursé une somme faramineuse<sup>12</sup>. Le bouton est devenu un accessoire de premier ordre pour montrer son rang.

En couture, d'autres moyens que le boutons existent pour fermer un vêtement : la fibule (agrafe en métal), l'épingle, les agrafes, les lacets, les aiguillettes, les rubans, etc. Mais le bouton va s'imposer grâce à la facilité avec lequel on peut mettre et ôter un vêtement boutonné (Figure C.2 8), d'abord dans le costume masculin dans lequel il devient l'unique attache à partir du XVIII<sup>ème</sup> siècle (voir Figure C.2 9), puis dans le vêtement féminin, où il se généralise au XIX<sup>ème</sup> siècle. Le bouton ne devient un accessoire de la mode féminine qu'à partir du moment où le costume féminin se rapproche du costume masculin, puis se libère<sup>13</sup>.



Figure C.2 8 – Le bouton facilite l'habillement. Cycle des Héros et des Héroïnes (détail), v. 1420, peinture à fresque, Château de la Manta, Italie. Image : les8petites8mains.blogspot.com

Le bouton a été et est toujours utilisé pour fermer les manches des chemises, les culottes, les pantalons, les redingotes, les vestes de costumes, et il a été massivement employé dans les uniformes militaires. Avec la création des uniformes et leur diffusion, au XIX<sup>ème</sup> siècle et en particulier sous le Second Empire, l'industrie française du bouton se développe à vive allure et fournit les armées de toute l'Europe [141].

<sup>12</sup> SAINT-SIMON, *Mémoires*, Tome 12, Chapitre 1.

<sup>13</sup> Noter que le vêtement masculin se boutonne à droite, car l'homme s'habille seul ; le vêtement féminin se boutonne à gauche, car c'est une femme de chambre qui habille les dames.



Figure C.2 9 – Trois élégants, trois époques, trois boutonnages. (a) Anonyme, *Saint-Mégrin*, v. 1575-1578, aquarelle, gouache et or à la coquille sur vélin, MI1097, musée du Louvre. Image : M. Beck-Coppola, Musée du Louvre. (b) *Galerie des modes et costumes français*, 1778, pl.52, d'après un dessin de P.-T. Leclerc, *Jeune élégant en habit moucheté avec une veste blanche garnie de bandes d'indienne*. Bibliothèque du musée des Arts décoratifs. Image : mfa.org. (c) G. Boldini, *Robert de Montesquiou*, 1897, huile sur toile, RF 1977 56, musée d'Orsay, Paris. Image : Hervé Lawandowski, RMN-Grand Palais.



Figure C.2 10 – Le bouton dans le vêtement féminin : l'émancipation. (a) Suffragettes portant des vêtements d'inspiration masculine, 1911. Image : alternativelibertaire.org. (b) Ensemble Corrège, années 60.

### 2.2.2 Formes et aspects de surface

Tous les boutons sont différents. Selon la période à laquelle ils ont été fabriqués, le style du vêtement auquel ils appartiennent, sa fonction ou son origine, les boutons présenteront des aspects de surface et des formes différentes. Les boutons anciens étaient en os, en corne, en ivoire, en cuir, en métal, en faïence ou en nacre. Aujourd'hui, l'immense majorité des boutons est en plastique. On distingue parmi les boutons deux formes principales : le bouton à trous et

le boutons à queue (Figure C.2 11). La couture d'attache est différente pour ces deux types de boutons. Le bouton à queue est fréquemment de forme plus marquée que le bouton à trous ; ce dernier correspond en règle générale mieux à l'impression 2.5D. Pour la couleur, la matière, le brillant et le motif, toutes les fantaisies sont permises.

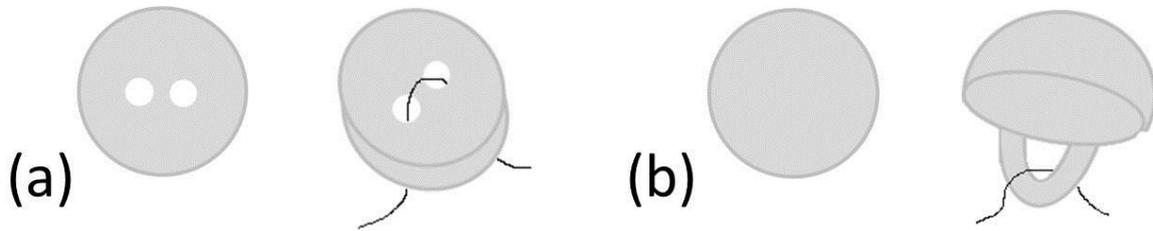


Figure C.2 11 – (a) Bouton à trous et (b) bouton à queue.

### 2.2.3 Problématique en restauration

Comme leur fixation est fragile, il arrive souvent que des boutons manquent sur un costume. La lacune consiste alors en l'absence d'un ou plusieurs des boutons d'un même vêtement. Il suffit qu'un seul d'entre eux ait été conservé pour qu'on connaisse son apparence, et que la reproduction des autres éléments soit envisageable.

Certains boutons, qui présentent une apparence mate, colorée, rugueuse, en semi-relief, sont des candidats pertinents à la reproduction en impression 2.5D, qui serait alors une aide intéressante à la restauration. En effet, un restaurateur peut parfois proposer des restitutions en matériaux de comblement qu'il viendrait ensuite patiner ou peindre. Mais pour certains objets (imaginons un bouton en textile très rugueux), l'impression 2.5D donnera certainement un résultat en texture plus pertinent ; à nous de créer l'aspect coloré mat qui convienne. Nous allons donc explorer ici la pertinence de la technologie 2.5D comme support à la restauration textile, dans le cas précis du bouton.

## 2.3 Etude préparatoire

### 2.3.1 Boutons tests

Lors d'une première visite aux ateliers du musée Galliera, nous avons sélectionné 14 boutons d'étude dans le stock non inventorié des restauratrices. Ces boutons présentent une large gamme d'états de surface, même s'ils sont majoritairement mats. Certains sont en velours (comme les boutons n°2 ou 5), d'autres en plastique (bouton n°4) ; certains sont quasiment lisses et d'autres très en relief. Ils sont donnés Figure C.2 12.

Une analyse plus fine donnée Table C.2 1 de ces boutons nous a permis d'en éliminer une partie.



Figure C.2 12 – Boutons d'étude issus des réserves non inventoriées du musée Galliera. Les boutons 3 et 10 sont en double.

Bouton n°	Raison de son élimination
3 et 3 bis	Scan 3D impossible à réaliser à cause de la surface satinée du motif.
5	Reconstruction 3D impossible à réaliser à cause de la surface très régulière du motif.
6	Reconstruction 3D impossible à réaliser à cause de la surface très régulière du motif.
7	Objet trop petit et satiné.
8	Reconstruction 3D impossible à réaliser à cause de la surface très régulière et brillante.
10 et 10 bis	Double aspect brillant/mat qui rend le scan 3D impossible.
11	Objet trop plat pour nos critères.

Table C.2 1 – Raisons de l'élimination de 7 des boutons sélectionnés.

### 2.3.2 Acquisition de la forme

La première difficulté que nous avons rencontrée concerne l'acquisition de la forme des boutons. En effet, certaines surfaces se prêtent très mal au scan 3D sous lumière structurée : les surfaces brillantes, les surfaces à double aspect brillant et mat, ou encore les surfaces présentant une texture trop régulière ou répétitive. Sur ces dernières, la reconstruction et la superposition des scans les uns sur les autres est rendue impossible par le motif, sur lequel aucun point de repère ne peut être positionné. La microtopographie apparaît alors comme la solution pour scanner ce type de surfaces. Mais elle a le défaut d'écraser légèrement les formes : la microtopographie ne permet de faire que l'acquisition de la structure de surface, et non de la forme de l'objet. Cela est illustré par la Figure C.2 13.

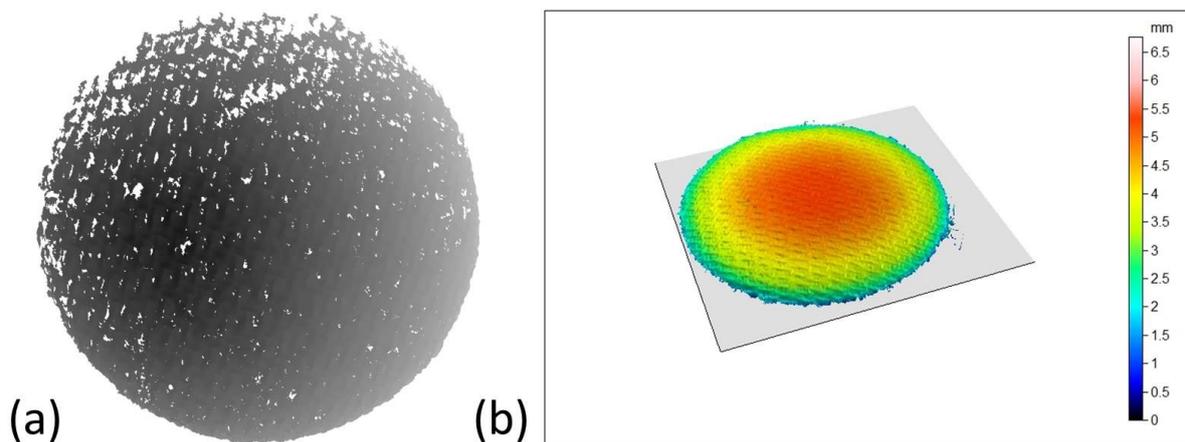


Figure C.2 13 – (a) Reconstruction 3D du bouton n°6 effectuée avec le scanner 3D. L’image est incomplète car la reconstruction est impossible à terminer. Environ 45 min de scan. (b) Scan 3D du même bouton n°6 effectué avec la station de microtopographie. 5 heures de mesure.

Les caractéristiques des boutons sélectionnés pour la suite de l’étude sont données Table C.2 2. La Table C.2 3 présente les boutons en regard avec le scan effectué et la cartographie résultante utilisée pour l’impression. On y voit que les structures relativement complexes, à très petite échelle (le diamètre des boutons ne dépasse jamais 2.60 cm !), sont difficiles à scanner. Les cartographies présentent en conséquence quelques points non mesurés, ce qui n’est pas forcément ennuyeux dans la mesure où ils peuvent être comblés numériquement.

Bouton n°	Type de bouton	Aspect de surface	Texture	Couleur
1	à trous Ø 2.60 cm	satiné	en léger relief	bronze
2	à trous Ø 1.80 et 1.90 cm	mat	à lignes	rose
4	à queue Ø 2.20 cm	brillant	relief bombé	blanc plastique
9	à queue Ø 1.60 cm	mat et métallique	à chevrons	vert et or
12	à queue Ø 2.30 cm	satiné et mat	points, permes et broderie	vert et or

Table C.2 2 – Caractéristiques des boutons tests.

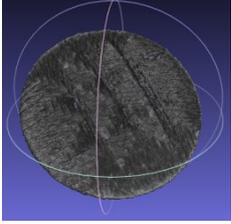
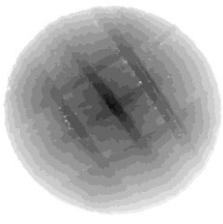
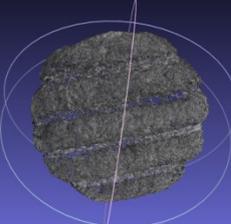
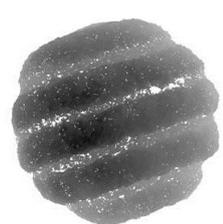
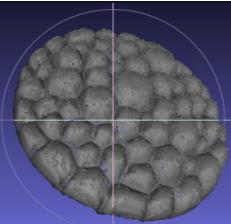
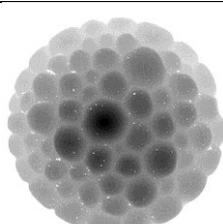
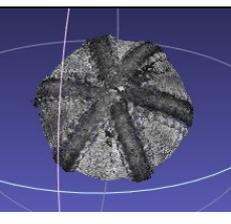
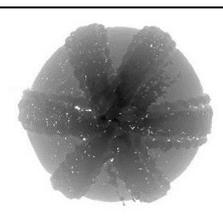
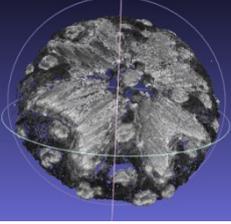
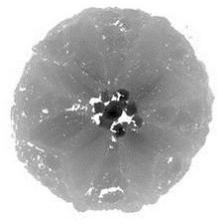
Bouton n°	Photographie couleur	Scan 3D	Cartographie
1			
2			
4			
9			
12			

Table C.2 3 – Boutons tests, scans effectués sous scanner à lumière structurée et cartographies résultantes.

### 2.3.3 Brillant et couleur

La mesure du brillant et de la couleur sur ce type d'objets pose problème. Pour le brillant, le problème majeur est la taille des objets. Le glossmètre est inutilisable : les boutons sont en relief et trop petits pour que la mesure soit possible. La rugosimétrie est envisageable pour trouver la surface imprimée « la plus proche ». Dans ce cas précis, la comparaison avec une charte de niveaux de gloss, comme la NCS Gloss Scale™, paraît plus pertinente. Les niveaux de brillant que nous en avons déduit sont donnés Table C.2 4.

Bouton n°	Brillant spéculaire à 60° (GU)
1	50
2	2
4	75
9	2 et 50
12	2 et 30
6	2

Table C.2 4 – Brillant spéculaire à 60° déduit de la comparaison avec la NCS Gloss Scale™ pour les 5 boutons sélectionnés, auxquels nous avons ajouté ici le bouton n°6.

La mesure de la couleur est plus problématique. Le spectrophotomètre est inutilisable ; la photographie calibrée n'est pas non plus adaptée. En effet, certains des textiles qui recouvrent les boutons sélectionnés présentent des aspects de moiré ; la sensation colorée est changeante selon l'orientation du bouton. Les boutons 1 et 9 qui présentent ce type d'aspect seront donc impossibles à reproduire en couleur. Nous pouvons tout de même recréer leur structure, que les restauratrices viendront ensuite patiner avec une peinture métallique.

#### 2.3.4 Premières impressions

Les premiers tests d'impression (donnés Figure C.2 14) sont encourageants mais pas entièrement satisfaisants. Les boutons sont un support d'étude délicat ! La couleur est le principal souci, sa mesure ne pouvant s'effectuer simplement. Sur ces tests, les photographies couleur n'ont pas pu être effectuées, pour des raisons de temps et de disponibilités matérielles. Et même si elles avaient été effectuées, elles ne rendraient la texture visuelle que sous un éclairage donné, pour une orientation de l'objet et de la caméra. La texture visuelle est le second problème majeur. Le scan 3D donne la texture physique de l'objet, sa rugosité. Mais visuellement, les fibres textiles créent une sensation de brillant changeante, qui est perdue sur l'imprimé (c'est le cas pour l'imprimé n°1).

Il apparait que la rugosité donnée par la microtopographie est bien meilleure que celle donnée par le scanner 3D. La structure obtenue pour l'imprimé n°6 est plus pertinente que celle de l'imprimé n°1, donnée par le scanner 3D, même si la question de la couleur reste entière. Enfin, précisons que l'ajout d'une micro-structure imprimée au-dessus de la couche qui forme le relief est compliqué sur des objets aussi petits, à la texture si fine : la micro-structure brouille le relief très fin qui se trouve en dessous, l'effet est donc contre-productif.



Figure C.2 14 – Premiers tests de textures sur les boutons 1 (en haut), 2 (au milieu) et 6 (en bas). Images : A. Maigret et M. Page, C2RMF, 2018.

### 2.3.5 Recommandations

En conclusion, le bouton est un objet d'étude complexe. L'utilisation du scanner 3D ne lui est pas très bien adaptée : l'objet est trop petit pour les capteurs, et son relief parfois trop périodique pour que la reconstruction soit possible. La microtopographie permet une bonne acquisition des reliefs, mais les scans sont très longs (compter 5 heures pour scanner 2 cm<sup>2</sup>) et l'on perd l'information sur les bords incurvés de l'objet. L'aspect parfois satiné des textiles est très complexe à rendre ; la texture visuelle devrait être choisie à une orientation spécifique, ce qui peut potentiellement poser problème lors de l'exposition de l'objet. Nous recommandons donc de choisir des **boutons monochromatiques uniformément mats**, et si possible d'effectuer des photographies couleur calibrées pour imprimer la texture visuelle et la couleur.

## 2.4 Boutons choisis

Plusieurs boutons monochromatiques et mats ont été sélectionnés pour donner lieu à une impression complète (forme, brillant et couleur) dans le cadre d'un protocole de restauration. Le travail est actuellement en cours.

## 3. Le bandage de roue en bronze

### 3.1 Genèse du projet

Le projet bronze a été impulsé par Shéhérazade Bentouati, restauratrice spécialisée dans les Arts du Feu, régulièrement en charge de projets de restauration d'œuvres au sein de la filière Archéologie du C2RMF, avec l'accord et le soutien de Manuel Leroux, chef de travaux d'art au C2RMF, Noëlle Timbart, chargée des Antiquités égyptiennes et orientales au C2RMF, et François Bridey, conservateur du patrimoine au département des Antiquités orientales du Musée du Louvre. L'idée du projet est de tester l'impression 2.5D dans le contexte concret de la restauration d'un objet archéologique. L'objet en question est une pièce archéologique très ancienne et fragmentaire, dans un état de dégradation assez avancé, qui a fait l'objet de différentes analyses au C2RMF, d'une étude et de premiers travaux en restauration, et dont le remontage est prévu. Nous avons pensé que nous pouvions profiter de ce remontage pour tester l'impression 2.5D comme matériau de comblement dans un contexte archéologique.

### 3.2 L'objet : un bandage de roue

#### 3.2.1 Contexte archéologique

Le bandage de roue (numéro d'inventaire Sb 14679) sur lequel travaille Shéhérazade Bentouati appartient à la **civilisation élamite** et est daté du XX<sup>ème</sup> siècle av. J.-C. Il est à rapprocher d'un bandage de roue reconstitué exposé dans la salle 9 de l'aire Richelieu du musée du Louvre ( Figure C.2 15). Trouvé dans une tombe située sous le Tell de l'Apadana, le grand palais érigé par Darius I<sup>er</sup> à Suse sur des restes plus anciens, cet objet en bronze entourait probablement une roue pleine en bois. Plusieurs missions françaises se sont succédé sur le site de Suse. On peut supposer que le bandage de roue provient d'un site proche ou du même site, et qu'il a été rapporté en France par une de ces missions archéologiques.

##### 3.2.1.1 *Suse et l'Elam*

L'Elam est un état antique, situé en actuel Iran, qui possédait deux capitales : Anshan dans le haut pays, et Suse dans la plaine, plus près de Babylone (voir carte Figure C.2 15). La présence humaine sur le site de Suse, sur les rives de la rivière Chaour, est attestée depuis le XL<sup>ème</sup> siècle av. J.-C., et est continue jusqu'au XIII<sup>ème</sup> siècle ap. J.-C., quand la conquête moghole chasse les derniers habitants. La civilisation élamite est le berceau de nombreux arts et techniques. Les penseurs élamites inventent l'écriture.

De nombreuses dynasties se sont succédées, assez bien connues grâce aux nombreux sceaux cylindres royaux retrouvés sur le site. La dynastie des Sukkalmah arrive au pouvoir vers 1930 av. J.-C., pendant la période historique dite « paléo-élamite », et la période archéologique dite « Suse V » (voir exemples Figure C.2 16). Cette période précède de peu celle du « classicisme élamite » au cours de laquelle se développe un art officiel important et novateur [142].

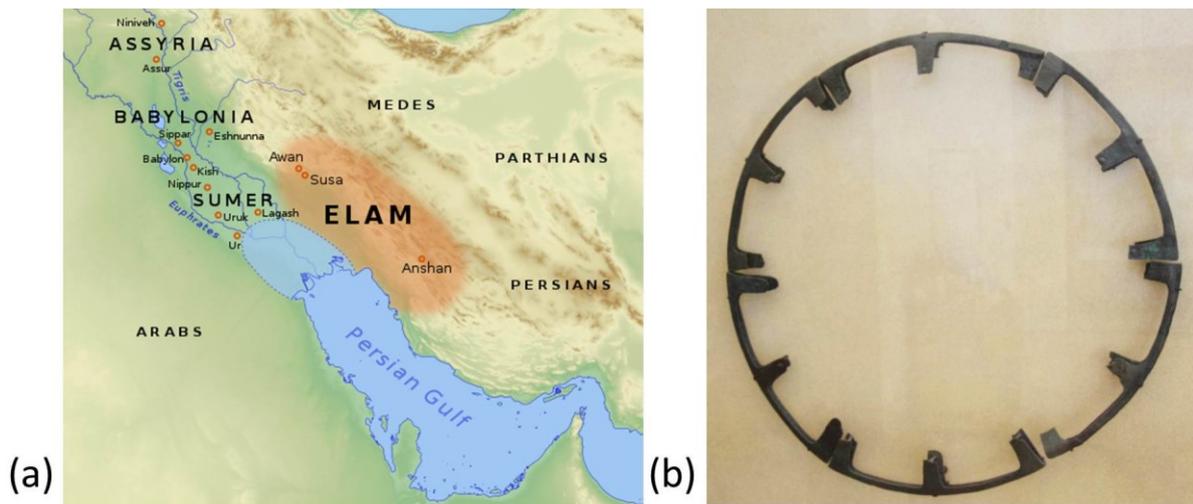


Figure C.2 15 – (a) Géographie de l’Elam. Image : wikimedia.com. (b) Bandage d’une roue de char composé de six éléments, bronze, XX<sup>ème</sup> siècle av. J.-C., dynastie des Sukkalmah, époque d’Attahushu (fouilles R. de Mequenem), Sb 6829, département des Antiquités orientales, musée du Louvre. Image : M. Page, C2RMF, 2018.



Figure C.2 16 – Exemples d’objets en provenance du site de Suse, datés du II<sup>ème</sup> millénaire av. J.-C. (a) Sceau cylindre, dynastie des Sukkalmah, Suse V, époque néo-sumérienne, hématite, Sb 6225 (fouilles R. de Mequenem). Image : M. Page, C2RMF, 2018. (b) Figurine dite du « dieu à la main d’or », bronze et or, début du II<sup>ème</sup> millénaire av. J.C, Sb 2823. (c) Statuette de femme, Suse V, époque néo-sumérienne, dynastie de Shimashki et des Sukkalmah, tell de l’Acropole (fouilles J. de Morgan), coquille, Sb 2746. Images : Oi-Cheong Lee, Musée du Louvre. (d) Collier, Suse V, or et agate, Sb 17749. Image : Raphaël Chipault, Musée du Louvre, 2006.

### 3.2.1.2 Missions archéologiques françaises en Iran

La France et la Perse signent en 1895 un accord grâce auquel la France obtient le monopole des fouilles en Perse. La délégation archéologique française en Perse est créée deux ans plus tard : c'est le début de plus de 80 ans de présence française sur les sites archéologiques iraniens. Un second traité signé en 1900 confirme les prérogatives de la France, à laquelle reviendront la totalité des objets découverts sur les sites, en échange d'une compensation monétaire pour les biens les plus précieux. La France possède ainsi des collections prestigieuses et d'une très grande valeur archéologique et artistique, en vertu de ce traité signé par le Shah Muzaffar al-Din. Le but des archéologues et hommes politiques français aura surtout été d'évincer les britanniques dans la course archéologique qui se mène au tournant du XX<sup>ème</sup> siècle... [142]

Suse a été découverte en 1851 par deux britanniques, le colonel W.F. Williams et le géologue W.K. Loftus. L'ingénieur français Marcel Dieulafoy et sa femme Jane procèdent dans les années 1880 à plusieurs fouilles et persuadent les Musées français et l'état de l'importance du site. Après la signature des traités, l'archéologue Jacques de Morgan prend la tête des fouilles. Lui succéderont Roland de Mecquenem (entre 1912 et 1947), Romain Ghirshman (de 1946 à 1967) puis Jean Perrot (de 1968 à la révolution islamique de 1979). Ce dernier est le premier archéologue de Suse qui fouilla en appliquant les méthodes de l'archéologie moderne [142, 143].

### 3.2.1.3 L'art du bronze en Elam

Il semblerait que l'art du bronze ait atteint son apogée autour du XX<sup>ème</sup> siècle avant notre ère chez les Elamites, avant d'être progressivement remplacé par le fer [144]. Les mines de cuivre du pays ont favorisé le développement d'une importante métallurgie. De nombreux objets en alliage cuivreux proviennent de l'Elam, tels des cachets, des haches, des plaques murales, des plats, et aussi des pièces de statuaire très massives, comme la statue de la reine Napir Asu, ou la table aux serpents, conservés au musée du Louvre [145].

### 3.2.1.4 Bandages de roue

Les bandages de roue sont des objets circulaires dont le rôle est d'entourer et de protéger la roue. Le bandage de roue est donc en contact direct avec le sol. Il est probable qu'au II<sup>ème</sup> millénaire av. J.-C., les roues étaient encore pleines (Figure C.2 17), la roue creuse étant d'invention plus récente<sup>14</sup>.

Les bandages de roue font partie des éléments fréquemment retrouvés dans les tombes ou les sites de fouilles anciens. De nombreux bandages de roue existent en contexte archéologique : mésopotamiens, romains, celtes...

---

<sup>14</sup> Communication personnelle avec M. François Bridey, conservateur du patrimoine au Musée du Louvre.



Figure C.2 17 – Exemples de roues pleines. (a) Char à haut tablier et quatre roues pleines, terre cuite, Suse, époque médio-élamite, 2340-1500 av. J.-C., Sb 3068. Département des Antiquités orientales, musée du Louvre. Image : M. Page, C2RMF, 2018. (b) Char à roues pleines, détail de l'étendard d'Ur, marqueterie de calcaire, lapis-lazuli, coquillages et bitume, cimetière royal d'Ur, 2500 av. J.-C., 121201, British Museum, Londres. Image : en.wikipedia.org.

### 3.2.2 L'objet

#### 3.2.2.1 Description

L'objet qui nous intéresse est un bandage de roue constitué d'un alliage cuivreux, formé de 6 fragments non jointifs. La fiche d'identification de l'œuvre est donnée en Annexe C.2.1 et la Figure C.2 18 présente l'œuvre. Elle fait partie d'un ensemble de bandages de roue conservés au sein des collections d'Antiquité orientale du musée du Louvre. Certains de ces bandages ont fait l'objet d'études scientifiques au C2RMF.



Figure C.2 18 – Le bandage de roue en bronze. Les zones fragiles et lacunaires ont été entourées en rouge. Image : A. Chauvet, C2RMF.

On signale en particulier l'étude de Yannick Vandenberghe (C2RMF) sur les couches de surface (rapport n°36696) et celle de Pascale Richardin, Fiona Lobo et Eric Laval sur la possibilité d'une analyse au Carbone 14 de ces objets (rapport n°36154) [146, 147].

### 3.2.2.2 Apparence générale

L'ensemble de la surface de l'objet est très mat et rugueux. Une partie de la surface est recouverte de sédiments, qui lui donnent une couleur gris-beige. Le reste de la surface est de couleur verte ou bleu-vert, ce qui atteste la présence de cuivre (produits de corrosion). La Figure C.2 19 donne un exemple d'aspects de surface rencontrés sur l'objet.



Figure C.2 19 – Aspects de surface. On distingue les coloris gris, beige, vert et bleu. Image : A. Chauvet, C2RMF.

Du point de vue structurel, l'élément de bandage de roue sur lequel nous travaillons est constitué de 8 fragments séparés, numérotés sur la Figure C.2 18. Ils ont été réunis par les conservateurs et restaurateurs en charge de l'œuvre suite à l'étude des cassures et des aspects de surface. Entre les morceaux 4, 7 et 8, toute une zone est manquante ; de même entre les zones 4, 5 et 6, un léger décrochement est manquant, ainsi qu'entre les zones 1, 2 et 3. L'objet est lacunaire. Un neuvième fragment a été ajouté par la restauratrice, fragment qui présente un état de surface différent : la couche de corrosion a été décapée et la couleur résultante est plus bleutée. Selon la décision du comité de restauration, si l'objet entier venait à subir le même traitement de restauration, nous aurions déjà le matériel pour proposer un comblement adapté.

La Figure C.2 20 schématise les zones fragiles constituées par les fragments 4, 5 et 6 au centre de l'élément de bandage, et 4, 7 et 8 à son extrémité. On comprend que pour des raisons structurelles, les fragments ne peuvent être réassemblés sans constituer un comblement (figuré par les zones hachurées de la Figure C.2 20).

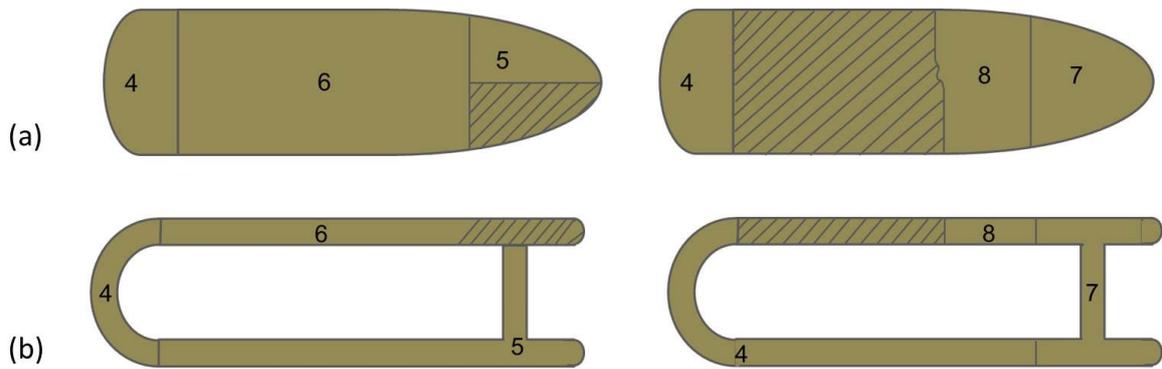


Figure C.2 20 – (a) Vue de dessus des zones 4-5-6 et 4-7-8. (b) Vue de côté des mêmes zones. Les parties manquantes sont signalées par les zones hachurées.

### 3.2.2.3 Problématique de restauration

Nous sommes donc face à un fragment de bandage de roue en bronze datant du II<sup>ème</sup> millénaire av. J.-C., dont les différents morceaux n'ont pas encore été réunis, et auquel manquent plusieurs parties. Après concertation avec les spécialistes de l'objet, la restauratrice en charge de l'œuvre a suggéré que nous utilisions le comblement par impression 2.5D de la zone située entre les fragments 4, 5 et 6 et de celle située entre les fragments 4, 7 et 8. Nous sommes face à un défi de taille : proposer un comblement en impression 2.5D, extrêmement mat, très rugueux, de couleur sombre inhomogène, qui s'insère dans un objet réel et crée une sensation visuelle satisfaisante.

## 3.3 Acquisition de l'apparence

### 3.3.1 Forme

La première étape de notre travail consiste en l'acquisition de la forme de chacun des fragments qui constituent le bandage de roue. L'acquisition 3D de l'ensemble des pièces est réalisée par Charlotte Hochart, ingénieur d'étude au C2RMF, au moyen du scanner à lumière structurée smartSCAN<sup>3D</sup>-HE<sup>TM</sup>. L'acquisition est faite sur le logiciel Optocad<sup>TM</sup>.

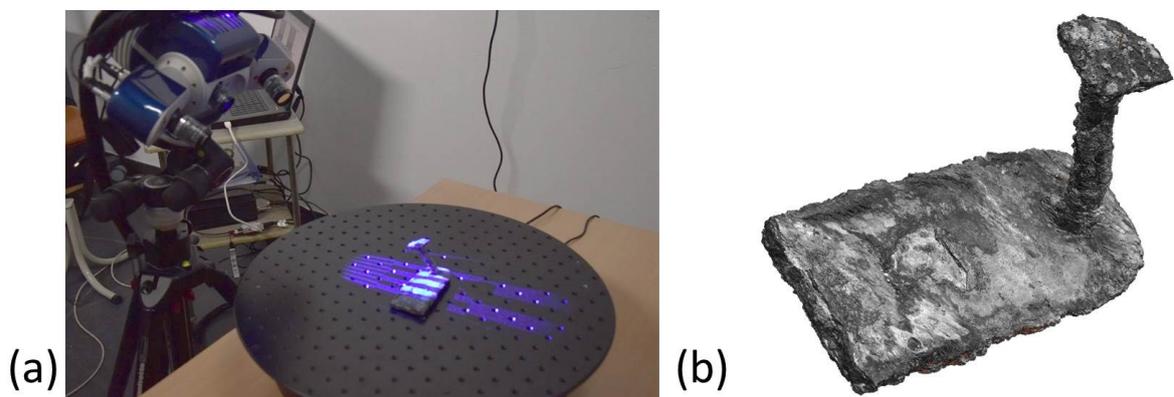


Figure C.2 21 – (a) Scanner à lumière structurée utilisé sur le fragment n°5. (b) Modèle 3D résultant.

La Figure C.2 21 présente le scanner utilisé et le modèle 3D obtenu pour le fragment n°5. La structure de ce modèle est tout à fait intéressante : elle donne à l'observateur une vision indépendante des variations de couleur, permettant de se focaliser sur les aspects de rugosité. En particulier, pour cet objet archéologique, la structure est une information précieuse : elle peut être reliée aux traces du bois qui devait constituer la roue. L'analyse de la texture physique de la surface des différents éléments des bandages de roue pourrait donc être un indicateur de la réunion des parties : si les traces de bois ont la même orientation, les fragments peuvent être jointifs. En conséquence, les conservateurs en charge de l'œuvre poursuivront l'étude 3D avec Charlotte Hochart.

### 3.3.2 Brillant

Des mesures de brillant spéculaire à 60° ont été réalisées au glossmètre sur des fragments relativement plats. Le contact entre l'objet et le glossmètre est envisageable sur ce type d'objets ; la mesure est rapide et n'a été effectuée que sur de petits fragments plats, sans risque de rupture, comme les fragments n°6 et n°9.

Zone	Brillant spéculaire à 60° (GU)	Ecart-type
6 - sédimentée	0.3	0.07
6 - bleutée	0.4	0.04
9 - bleuté	1.0	0.10
9 - corrodée	0.3	0.03

Table C.2 5 – Brillant spéculaire à 60° mesuré au glossmètre sur les fragments n°6 et 9. La mesure a été répétée plusieurs fois dans plusieurs directions puis moyennée.

Des mesures de rugosité ont été effectuées afin de placer le bronze dans l'espace des configurations imprimables. Les résultats ont été donnés au chapitre C.1 : le bronze ne se rapprochait d'aucune micro-structure imprimée jusque-là. C'est assez logique quand on voit à quel point les valeurs de brillant spéculaire obtenues pour le bronze sont faibles. Si nous appliquons l'abaque inversée de la configuration à piliers I, pour obtenir un brillant de  $g = 0.5$  GU (moyenne des niveaux de brillant donnés Table C.2 5), il vient :

$$h = \exp\left(\frac{1}{2.4189}(12.6431 - g)\right) = 151.42 \mu m$$

Cette valeur est bien plus importante que celles que nous avons implémentées jusqu'à présent. Or nous avons vu qu'à une hauteur de 100  $\mu m$  déjà, notre système était à sa limite : la hauteur des piliers créait une sensation satinée peu plaisante. Au-delà de 100  $\mu m$  de hauteur de piliers, l'observateur ne s'aperçoit plus que le brillant diminue ; la couleur est également impactée par la hauteur des piliers. En conséquence, nous choisissons plutôt de conserver une hauteur de 80  $\mu m$ . Cette hauteur a été entièrement caractérisée dans les parties précédentes et nous savons qu'elle produit une sensation visuelle mate satisfaisante (voir chapitre B.3 pour ce sujet).

### 3.3.3 Texture physique

Nous présentons également ici les résultats obtenus en microtopographie sur la rugosité des surfaces, qui apportent un complément d'information au scan 3D. Les topographies font état d'un relief assez varié, présentant tantôt des plateaux élevés, tantôt des vallées. Les cartographies présentées Figure C.2 22 ont été acquises sur une surface de 1 mm<sup>2</sup> (soit 1h30 de mesure) : des détails très fins sont présents sur une aussi petite surface. L'échelle considérée est évidemment différente et bien plus fine que celle accessible avec le scanner 3D.

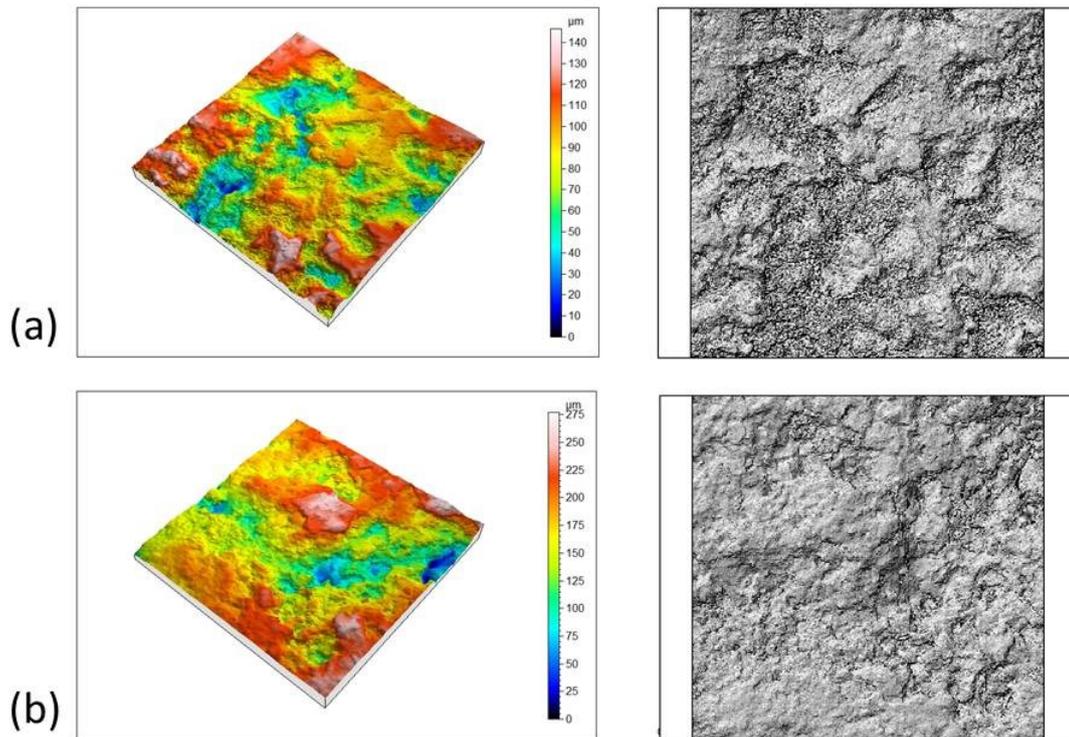


Figure C.2 22 – Microtopographies du bronze : images fausses couleurs et simulations photographiques correspondantes. Exemples tirés du fragment n°6 : (a) zone bleutée et (b) zone sédimentée.



Figure C.2 23 – Prises de vue sous microscope optique de différentes zones de bronze. (a) et (b) sur le fragment n°6 (barre d'échelle 1000 µm) et (c) sur le fragment découpé n°9 (barre d'échelle 500 µm).

Les prises de vue au microscope ajoutent l'information couleur aux micro-surfaces. La Figure C.2 23 en donne quelques exemples. On dénombre une grande variété de couleurs et d'états de surfaces au sein d'un même échantillon. Cette finesse de détails ne peut être rendue par l'impression 2.5D. Le but recherché n'est pas de recréer exactement la même surface, mais d'imprimer un objet qui ressemble visuellement à l'original, à une certaine distance d'observation.

### 3.3.4 Couleur

Différentes prises de vue ont été réalisées dans le studio photographique du C2RMF par la photographe Anne Maigret. Les captures ont été faites au moyen d'un boîtier Hasselblad™ (60 millions de pixels, 4000 x 5300 pixels) et suivant un protocole couleur strict donné par le groupe Imagerie du C2RMF (voir Figure C.2 24) [148]. Les couleurs sont contrôlées au moyen d'une charte Macbeth™ et réajustées sur Photoshop™. Les données  $L^*$ ,  $a^*$  et  $b^*$  sont donc fiables.



Figure C.2 24 – Protocole suivi pour la prise de vue en studio photo. Une charte couleur est utilisée pour la calibration. Image : A. Maigret, C2RMF, 2018.

Les Figure C.2 25 et Figure C.2 26 donnent différents exemples des prises de vue réalisées. Les données  $L^*$ ,  $a^*$  et  $b^*$  peuvent être récupérées au moyen d'un logiciel de traitement de l'image, comme Photoshop™.

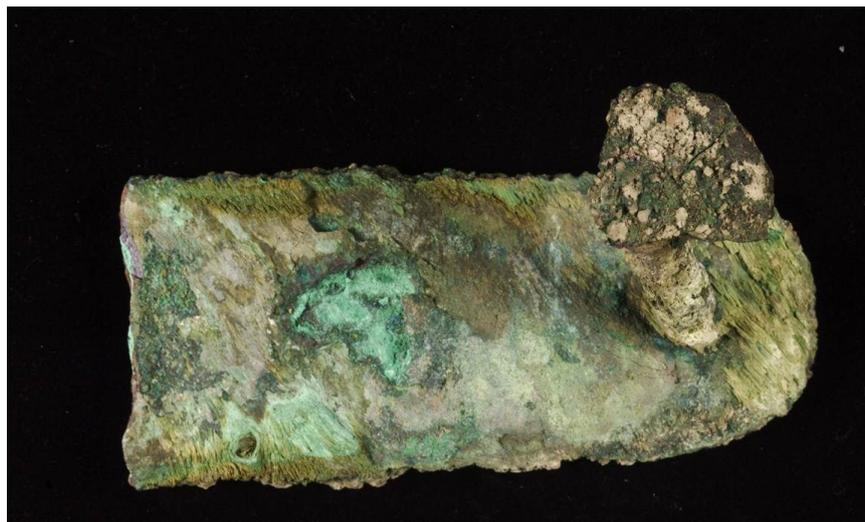


Figure C.2 25 – Prise de vue effectuée en studio photo. Fragment n°5 (environ 7 cm de long)  
Image : A. Maigret, C2RMF, 2018.

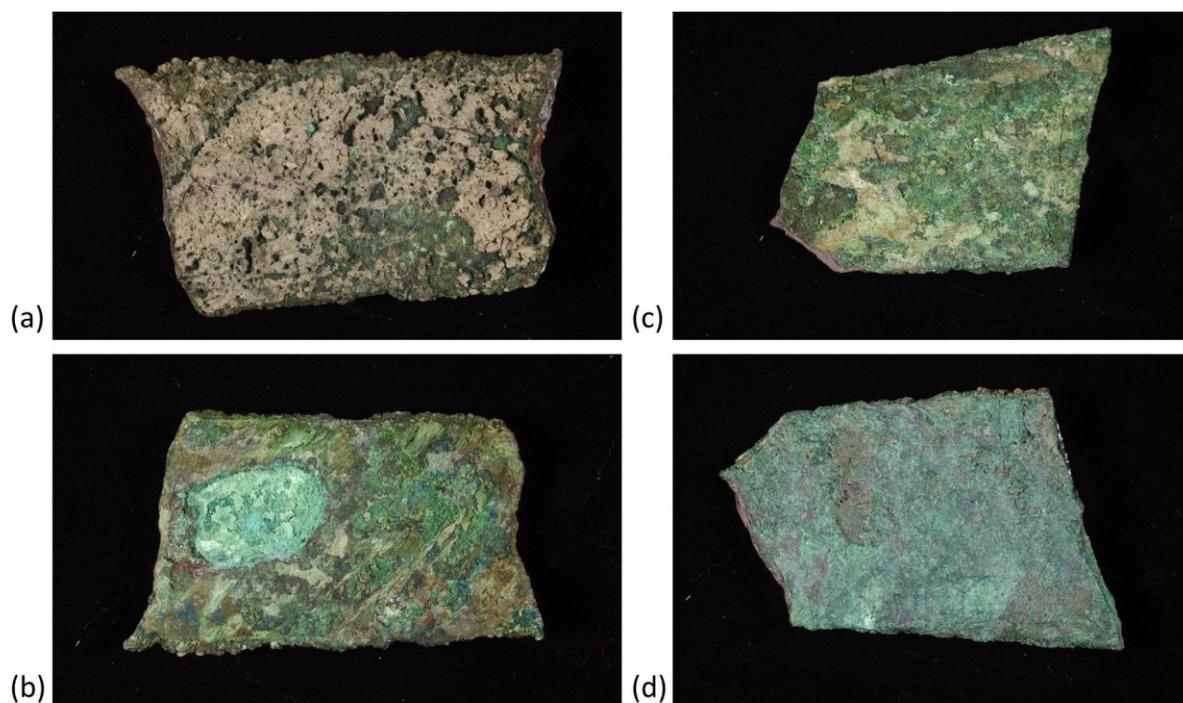


Figure C.2 26 – Prises de vue effectuées en studio photo. (a) et (b) Fragment n°6 recto et verso. (c) et (d) Fragment n°9 recto et verso. Les deux objets font environ 5 cm de longueur.  
Images : A. Maigret, C2RMF, 2018.

### 3.4 Création du comblement

#### 3.4.1 Forme

Les fragments, dont l'acquisition a été faite sous Optocad™, sont rassemblés numériquement au moyen du logiciel Meshlab™. Toute la suite du post-traitement (bouchage des trous, optimisation géométrique, détour de la forme manquante, recréation de la texture...) a été effectuée sur Geomagic™ par Charlotte Hochart (Figure C.2 27 et Figure C.2 28). Le détour de la forme est une étape complexe, numériquement très lourde à réaliser. Une fois la géométrie découpée, le logiciel permet le plaquage d'une texture sur la pièce créée. Nous avons simplement dupliqué la texture du fragment existant le plus proche sur cette pièce numérique.

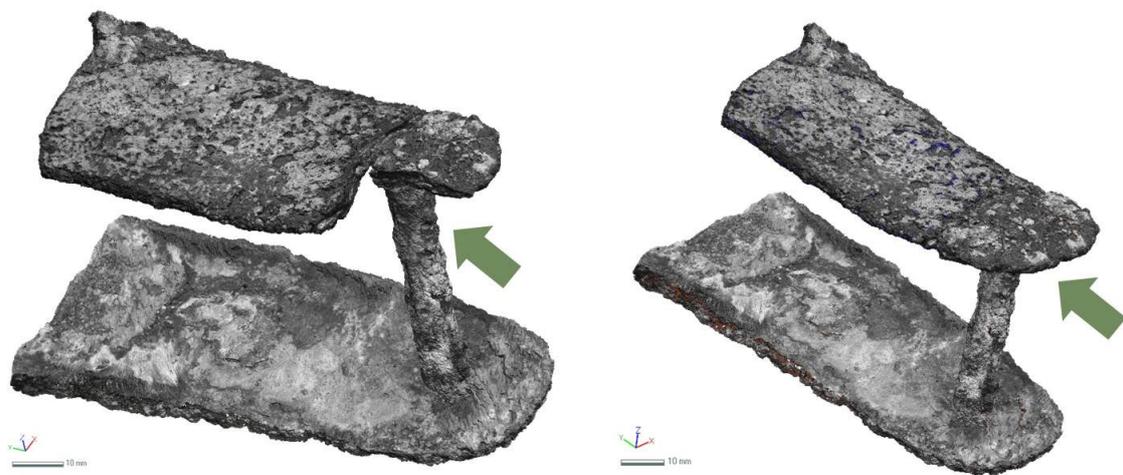


Figure C.2 27 – Fragments 5 et 6 assemblés, et création du comblement. Image : C. Hochart, C2RMF, 2018.

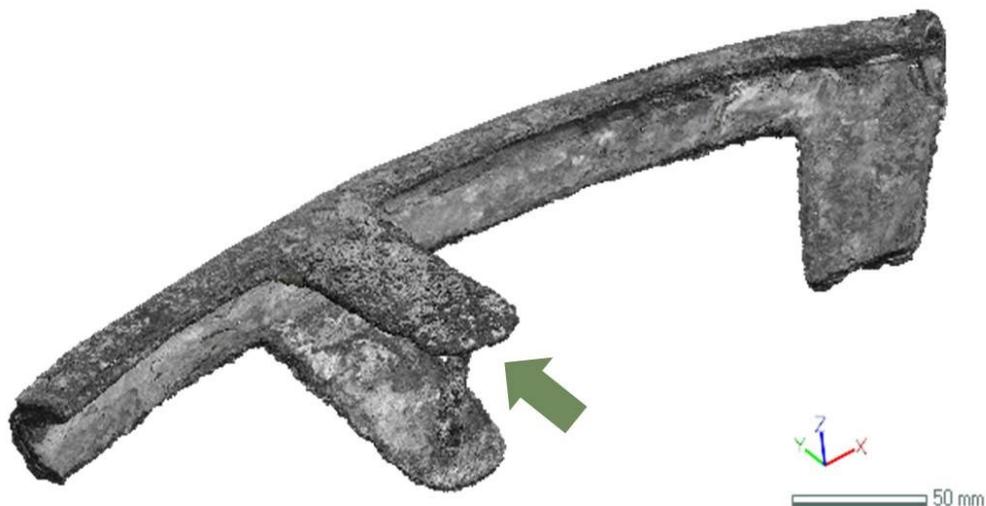


Figure C.2 28 – Fragments 4, 5, 6 et le comblement. Image : C. Hochart, C2RMF, 2018.

La cartographie des hauteurs est ensuite extraite au moyen d'un petit programme sur Blender™. C'est ce fichier qui sera envoyé à l'imprimante (Figure C.2 29).

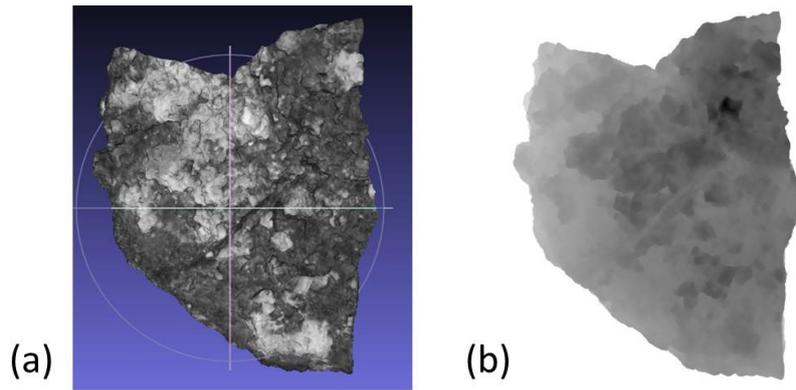


Figure C.2 29 – Comblement numérique. En (a), fichier obtenu après calcul géométrique et plaquage d’une texture. En (b), cartographie des hauteurs correspondantes.

On notera que cette étape numérique reste difficile à réaliser. Il nous semble important de souligner que restaurateur et ingénieur doivent travailler ensemble : sans le restaurateur, qui connaît le mieux l’œuvre, l’ingénieur peut se tromper (par exemple, placer une pièce numérique dans le mauvais sens) et perdre ainsi un temps de calcul énorme. Nous en avons fait l’expérience, trompés par des géométries proches (voir Figure C.2 30).

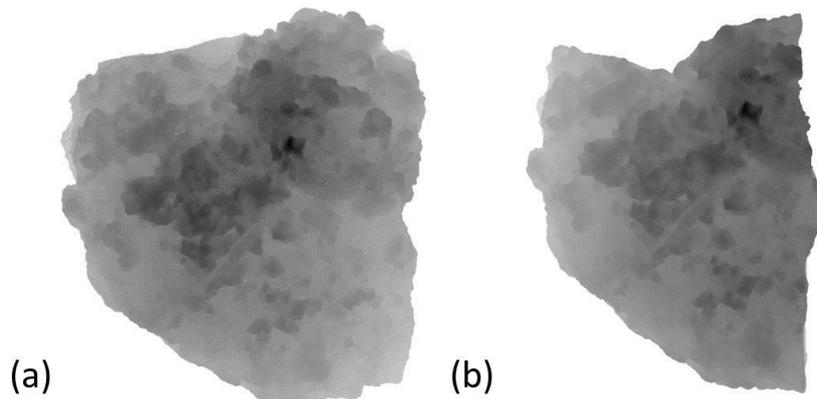


Figure C.2 30 – (a) Fichier erroné établi après un calcul numérique qui ne correspondait pas à l’hypothèse des conservateurs et restaurateurs de l’œuvre. (b) Fichier établi après correction.

Notons que la reconstruction numérique permet la création intéressante d’une tranche qui correspond nettement à l’objet. La création du comblement prend en effet quatre aspects en compte :

- La tranche du fragment n°5 ;
- La tranche du fragment n°6 correctement placé ;
- La forme arrondie du fragment n°5 ;
- La texture du fragment n°5.

La présence de la tranche n’est pas un aspect pertinent pour l’impression 2.5D, qui ne prend en compte que la forme de la couche supérieure du modèle numérique. Par contre, d’autres procédés 3D pourraient tout à fait créer la tranche adaptée.

### 3.4.2 Couleur et brillant

Nous avons vu que nous choisissons des piliers de  $80\ \mu\text{m}$  pour réaliser une structure mate en sous-couche. La configuration I est retenue. Elle est rappelée Figure C.2 31 : elle est constituée de micro-piliers de largeurs  $112\ \mu\text{m}$ , distribués de manière périodique sur l'espace. Ces piliers ont une hauteur  $h = 80\ \mu\text{m}$ .

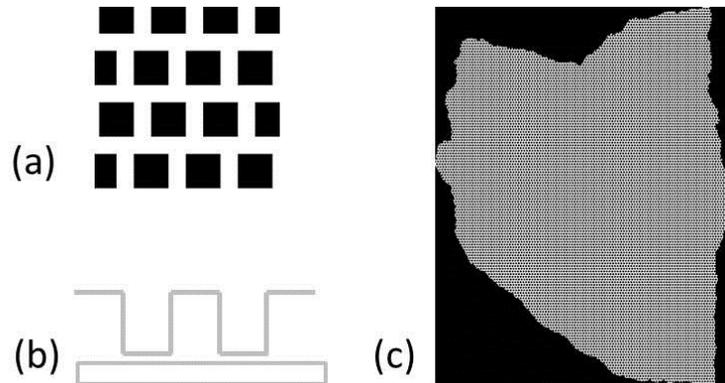


Figure C.2 31 – Piliers retenus. (a) Configuration I (un carré noir fait  $112\ \mu\text{m}$  de côté). (b) Ces mêmes piliers, vus en coupe. (c) Les piliers répartis sur l'ensemble du comblement.

La question de la couche couleur reste en suspens. Plusieurs problèmes se posent, en lien avec la texture de l'objet. En effet, grâce à l'étape de scan et de reconstruction numérique, nous avons créé une cartographie précise qui nous permettrait d'imprimer une certaine rugosité. Sur cette rugosité, nous viendrions appliquer une microstructure qui donne l'aspect visuel mat... puis une couche couleur. Mais comment composer cette couche couleur ?

- **Solution 1 :** A partir des photographies calibrées réalisées par Anne Maigret, on peut extraire une couleur  $L^*$ ,  $a^*$  et  $b^*$  dominante, et l'imprimer uniformément sur la surface (Figure C.2 32). Problème : l'aspect coloré sera uniforme, ce qui n'est pas très réaliste.
- **Solution 2 :** A partir des photographies calibrées réalisées par Anne Maigret, on peut extraire une texture de la forme de notre comblement (Figure C.2 33). Mais il n'est pas du tout certain que la superposition d'une couleur « texturée », avec des ombres et des effets de lumière dus à la prise de vue, sur une vraie rugosité, donne un imprimé résultant valide...



Figure C.2 32 – Solution 1 : extraction de couleurs  $L^*$ ,  $a^*$  et  $b^*$  simples. Mais laquelle choisir ? Image de gauche : A. Maigret, C2RMF, 2018.



Figure C.2 33 – Solution 2 : extraction de textures colorées. Les textures sont extraites des photographies prises sur les fragments n°5, 6 ou 9.

- **Solution 3** : Imprimer les photographies de la Figure C.2 33 sur une texture lisse, ce qui revient à raboter les détails de la cartographie des hauteurs Figure C.2 29 pour n'en garder que la forme générale. On perd alors un peu de l'intérêt de la technologie 2.5D.
- **Solution 4** : A partir de photographies calibrées réalisées par Anne Maigret, on peut extraire différents motifs élémentaires, sans contraintes d'ombrage, et les plaquer le long de la forme (Figure C.2 34).

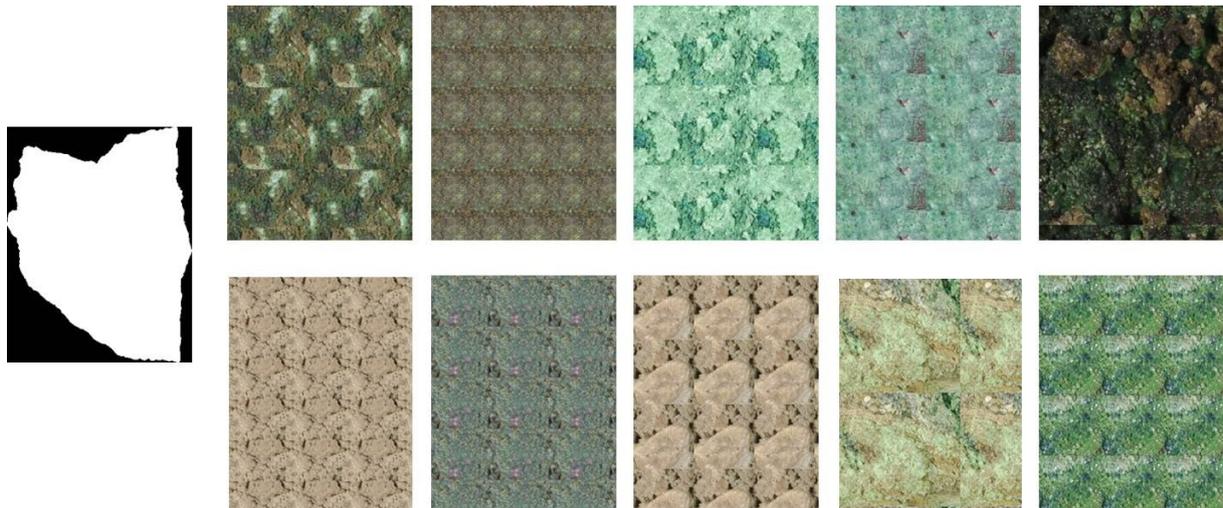


Figure C.2 34 – Solution 4 : extraction et combinaison de motifs colorés élémentaires. Les textures sont extraites des photographies prises sur les fragments n°5, 6 ou 9.

Nous avons testé plusieurs de ces solutions. Les résultats sont présentés dans la partie suivante.

Pour que la couche couleur n'impacte qu'au minimum le brillant de la surface, on appliquera les résultats de la partie B.4. Les valeurs  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  des couches couleurs sont connues, ce qui permet de les transcrire en *CMJN* via le profil ICC adapté.

### 3.5 Imprimés réalisés

Les imprimés que nous avons réalisés sont présentés dans cette partie.

Premières impressions : Seul le relief est imprimé. Il y est composé de 450 couches d'encre mêlées, cyan, jaune, noir et blanc. Seul l'imprimé situé le plus à droite sur la Figure C.2 35 comporte également du magenta. Ces imprimés, sans microstructure en sous-couche, sont mentionnés ici car leur couleur est intéressante : sans magenta, on obtient un aspect visuel assez proche de la couleur du bronze, même si le brillant est trop élevé. Sur ces couches identiques, la restauratrice a la possibilité de modifier la surface à sa convenance, sans que l'objet soit dégradé.

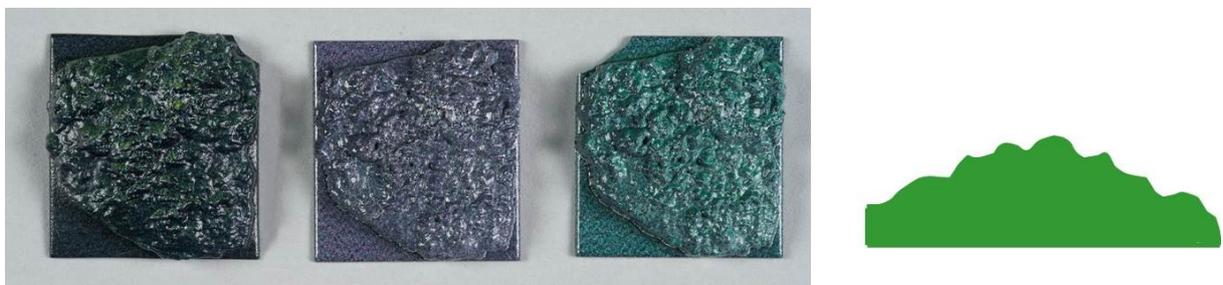


Figure C.2 35 – Premier essai d'impression. Toutes les encres sont utilisées pour créer un relief simple, sans microstructure affectant le brillant. Image : A. Maigret, C2RMF, 2018.

Deuxièmes impressions : Relief et couleur sont imprimés. Une couche épaisse d'encre blanche est intercalée entre le relief composé des diverses encres et la couche couleur. 444 couches forment le relief, suivies de 5 couches de blanc et d'une couche couleur. Le résultat (Figure C.2 36) est un imprimé logiquement trop brillant, mais qui présente une couleur intéressante.

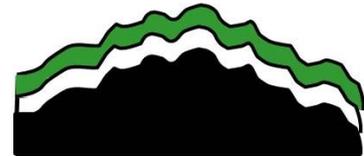
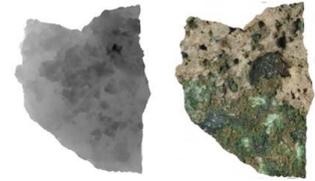


Figure C.2 36 – Deuxième essai d'impression. Toutes les encres sont utilisées pour créer la forme, puis du blanc est ajouté, et enfin une couche couleur issue des photographies calibrées.  
Image : A. Maigret, C2RMF, 2018.

Troisièmes impressions : Relief, brillant et couleur sont pris en compte. La sous-couche blanche est ici texturée selon la configuration I, à la hauteur de piliers 80  $\mu\text{m}$ . Plusieurs essais ont été réalisés avec différentes couches couleurs satisfaisant aux solutions 3 ou 4. Ils sont donnés Figure C.2 37.

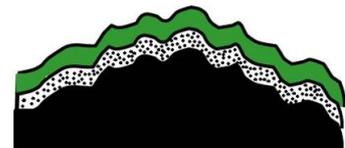
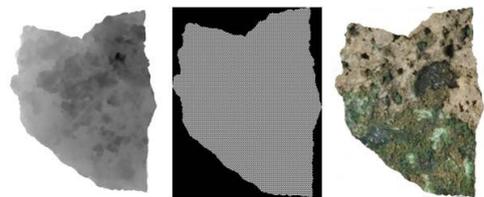


Figure C.2 37 – Troisième essai d'impression. Cette fois-ci la couche intermédiaire blanche est texturée en micro-piliers. On compte 369 couches d'encres mêlées, puis 80  $\mu\text{m}$  de piliers blancs et une couche couleur. Image : A. Maigret, C2RMF, 2018.

La sensation visuelle produite par ces derniers imprimés est la plus satisfaisante : la texturation du blanc en sous-couche contribue largement à diminuer le brillant spéculaire. Toutefois, après examen visuel, on trouve la surface légèrement satinée. Cela est dû à l'effet scintillant des encres, évoqué en Partie B. Mais à une certaine distance de l'imprimé, cet effet disparaît.

## 3.6 Perspectives

### 3.6.1 Vers la restauration

Une fois les imprimés réalisés, ils peuvent être confrontés à l'objet réel, et la restauration peut être envisagée. Sur la Figure C.2 38, un imprimé a été placé manuellement dans l'espace de la lacune : il s'adapte parfaitement, et sa texture donne un aspect granuleux très intéressant. A une certaine distance de l'objet (supérieure à 50 cm – 1 mètre), l'imprimé paraît mat et se fond donc sur la surface. En s'approchant, on distingue des effets satinés ou scintillants qui permettent de distinguer le comblement. La couleur de l'imprimé n'est pour l'instant pas conforme.



Figure C.2 38 – L'imprimé et l'objet. Image : A. Maigret, C2RMF, 2018.

Pour envisager la restauration, nous devons également répondre aux questions soulevées au chapitre C.1 : l'encre est-elle compatible avec les colles employées ? Quelle est sa réaction sous illumination prolongée ?

### 3.6.2 Comparaison avec d'autres méthodes de restauration

Pour conclure notre projet, il nous faut également comparer cette technologie d'impression avec le résultat que produiraient d'autres méthodes de restauration, traditionnelles ou numériques. La technologie 2.5D a montré qu'elle était bien adaptée à notre cas d'étude, car elle permet l'obtention d'un objet finement texturé, coloré et mat. Cet objet peut ensuite être imprimé en plusieurs exemplaires, ce qui laisse envisager des restaurations futures facilitées (imaginons par exemple que la couleur se dégrade sous UV : changer le comblement ne

nécessiterait pas de refaire toute l'étude). L'étape la plus longue est celle du scan 3D et du calcul numérique du comblement. Or le scan 3D a montré son intérêt au titre de l'étude de l'objet, afin de visualiser sa texture et d'en proposer un remontage numérique : il est de toute façon réalisé. Nous sommes allés plus loin en créant réellement le comblement. Celui-ci peut ensuite être envoyé vers une autre technologie d'impression, ce que nous avons fait en commandant sur internet deux versions imprimées 3D.

Le comblement a ainsi été imprimé en plastique transparent (compter environ \$5) et en plastique noir (\$7). Ces deux échantillons présentent des tranches qui collent parfaitement avec celles des fragments réels, ce qui n'est pas le cas de l'imprimé 2.5D. L'imprimé noir présente une surface assez mate, intéressante, que la restauratrice pourrait venir peindre ou patiner.

Il est certain que les technologies d'impression en relief apportent un bénéfice sur la texture des objets imprimés, qui ne serait pas aussi finement rendue par une résine travaillée par un restaurateur. Dans le cas des imprimés 3D, la couleur n'est pas rendue ; l'imprimé nécessite donc une retouche de la part du restaurateur. Dans le cas des imprimés 2.5D, nous arriverons à créer des surfaces mates et colorées, en plusieurs exemplaires, qui ne nécessiteront pas de retouches.

## 4. Les matrices de sceaux

### 4.1 Genèse du projet

Ce travail sur les matrices de sceaux a été impulsé par Dominique Robcis, restaurateur métal au C2RMF. Il a été effectué avec l'aide précieuse de Manon Castelle, qui était alors en post-doctorat au CEA, et sous le contrôle de Clément Blanc, responsable des collections sigillographiques aux Archives nationales. Le projet en lui-même portait sur les différentes techniques de mesure des aspects de surface et leur apport au cas particulier de la sigillographie, ce qui a fait l'objet d'une communication lors d'une journée d'étude aux Archives nationales [149]. En parallèle, nous nous sommes demandés quel serait l'intérêt éventuel de la technologie 2.5D pour la sigillographie.

### 4.2 Sceaux et matrices de sceaux

#### 4.2.1 Définitions

Les objets considérés ici sont issus des collections de sigillographie des Archives nationales. Les **sceaux** sont des empreintes apposées sur des documents manuscrits ou des objets pour les cacheter et en affirmer la provenance et l'authenticité. Le mot désigne à la fois l'empreinte et l'objet qui laisse cette empreinte, même si nous désignerons ici par **matrice de sceaux** ce dernier. Le sceau peut être une simple marque présentant des inscriptions à l'encre, mais il peut aussi être formé en relief par de la cire ou du plomb [150]. Les sceaux sont utilisés depuis la Haute Antiquité : on peut citer les célèbres sceaux-cylindres mésopotamiens. Au

tout début du Moyen-Age, l'usage de sceaux est réservé à la personne royale, mais peu à peu, il se répand à l'ensemble de la population : personnages officiels laïcs ou religieux, seigneurs, curés, chevaliers, bourgeois, marchands, clercs, artisans etc. Le sceau ne présentait d'abord qu'une face, mais l'habitude se prit d'en cacheter parfois ses deux côtés (le sceau apposé au verso s'appelle le contre-sceau). Plus l'empreinte est complexe, et plus le sceau est difficile à contrefaire. Le sceau doit permettre d'identifier son propriétaire : il combine imagerie et lettrage – des signes (les *types*) et un texte (la *légende*) [151]. Des exemples sont donnés Figure C.2 39 et Figure C.2 40. Les sceaux présentent ainsi souvent toute une imagerie, d'un relief très fin et d'une exécution précise. Les matrices de sceaux sont l'œuvre d'artisans qualifiés ou d'orfèvres. Elles sont la plupart du temps formés par un alliage métallique de bronze, de cuivre ou de laiton [152].



Figure C.2 39 – (a) Sceau rond en plomb présentant les saints Pierre et Paul et (b) son contre-sceau avec le nom du pape. Bulle du pape Alexandre IV (1254-1261), H 1402-28. Images : Archives départementales de L'Yonne.



Figure C.2 40 – (a) Sceau en navette en cire verte présentant Jeanne, reine de France et de Navarre, comtesse de Champagne, entourée des écus de France et de Navarre et (b) contre-sceau aux armes royales et de Champagne. 1286, H 674-11. Images : Archives départementales de L'Yonne.

La matrice de sceau peut être de forme ronde ou ogivale (dite « en navette »). La forme en navette est essentiellement utilisée par les ecclésiastiques et les femmes, tandis que les laïcs préfèrent la forme ronde. La matrice est fermement apposée sur une boule de cire d'abeille, parfois teinte à l'aide de colorants, pour former le sceau. Comme le montre la Figure C.2 41, celui-ci peut être formé directement sur le support à cacheter – il est alors dit *plaqué* – ou pendre sous le support au moyen d'une languette de cuir ou de parchemin (sceau *appendu*). Le sceau appendu a donc deux faces, son revers pouvant porter un contre-sceau [151].

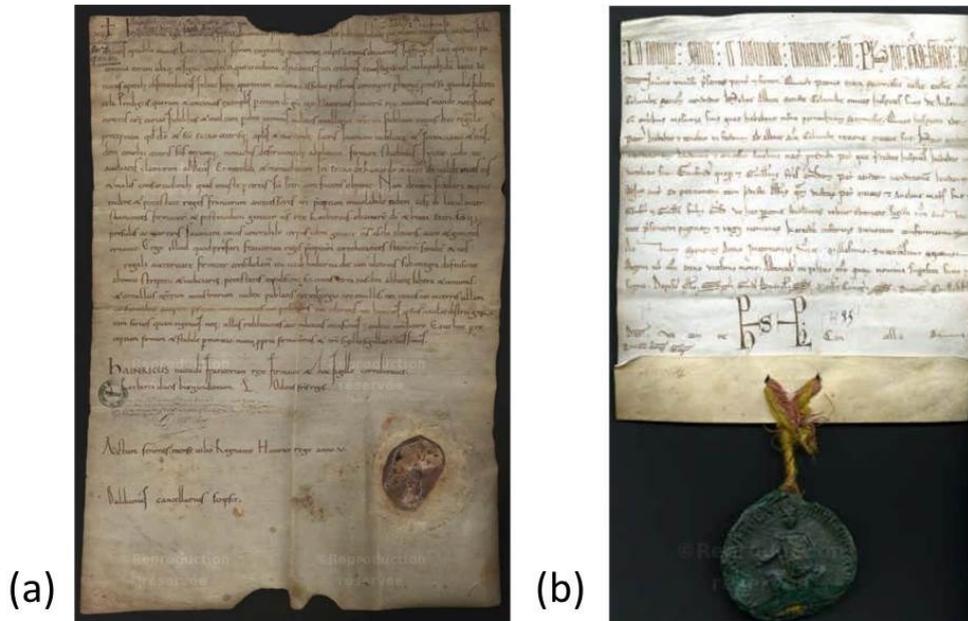


Figure C.2 41 – (a) Sceau plaqué. Charte du roi Henri I<sup>er</sup>, 1035, H 32-1. (b) Sceau appendu. Charte de Philippe-Auguste, confirmative d'une sentence arbitrale réglant les droits de l'abbaye Sainte-Colombe de Sens sur la forêt de Nailly, 1204, H 85-6. Images : Archives départementales de L'Yonne.

#### 4.2.2 Problématique

Les Archives nationales renferment une collection de sceaux, de matrices de sceaux et de moulages d'une très grande valeur historique. Au XIX<sup>ème</sup> siècle, des moulages ont été effectués sur les originaux des Archives ; ces moulages sont actuellement consultables sur demande par les chercheurs, étudiants et particuliers, mais ils ont leurs faiblesses. Ils se détériorent ; la couleur qui leur est parfois apposée pour faciliter la lecture se dégrade ; chacun d'entre eux n'existe qu'en un seul exemplaire et reste fragile. Les technologies d'acquisition 3D pourraient remplacer très avantageusement les techniques de moulage : sans contact, le scan 3D donne un fichier numérique lisible par tous sur un ordinateur équipé d'un logiciel de visualisation 3D, et éventuellement imprimable. Du point de vue de la conservation, de la transmission des savoirs et de la pédagogie, la création de nouvelles reproductions fidèles, détaillées et lisibles, est d'un réel intérêt.

Nous avons donc réalisé l'acquisition et l'impression de certains sceaux et matrices provenant des collections des Archives nationales. Les résultats sont donnés ci-après.

## 4.3 De l'imagerie à l'impression en relief

### 4.3.1 Matrices et sceau sélectionnés

Les objets sélectionnés sont donnés Figure C.2 42. Leurs caractéristiques sont présentées Table C.2 6.



Figure C.2 42 – Matrices de sceaux et sceau en cire sélectionnés pour l'étude. (a) Matrice de sceau n°115. (b) Matrice de sceau n°152. (c) Matrice de sceau n°124. (d) Sceau de Guillaume de Hainaut (que l'on notera ici G. de H.).

	A appartenu à	Période	Matériau	Dimensions	Forme
115	Abbesse du couvent des Clarisses d'Aix en Provence	XIV <sup>ème</sup> siècle	Bronze	64 x 39 cm	en navette
152	Couvent des Clarisses d'Aix en Provence	XIV <sup>ème</sup> siècle	Bronze	64 x 39 cm	en navette
124	Abbaye de Corbie	XIII <sup>ème</sup> siècle	Bronze	13 x 46 cm	ronde
G. de H.	Guillaume de Hainaut	XIII <sup>ème</sup> siècle	Cire	≈ 10 x 10 cm	ronde

Table C.2 6 – Caractéristiques physiques des matrices et du sceau sélectionnés.

La matrice de sceau n°124 date de la deuxième moitié du XIII<sup>ème</sup> siècle. Elle a été conçue pour le baillage royal de Corbie, dans la Somme. De forme ronde, elle présente des signes symétriques et très lisibles : un oiseau tient une épée dans son bec et est entouré de deux fleurs de lis et de deux clés. La légende mentionne en latin « + S'. BAILLIVIE : CORBEIENSIS ». L'oiseau, un corbeau, a été choisi pour le jeu de mot corbeau (en latin

*corvus*, en ancien français *corbel*) / Corbie. Les fleurs de lys renvoient au pouvoir royal et le glaive à la justice temporelle. Le symbole du glaive remplace ici celui de la crosse de l'évêque, qui figure sur la plupart des autres sceaux de Corbie connus<sup>15</sup>. La forme simple de cette matrice, la clarté des types et la symétrie de l'ensemble en font un objet d'étude simple. Son état de surface est patiné et relativement mat.

Les matrices de sceaux n°115 et 152 proviennent toutes deux du couvent des Clarisses d'Aix-en-Provence. Elles sont toutes deux datées du premier tiers du XIV<sup>ème</sup> siècle et proviennent certainement d'un atelier italien (probablement napolitain). Les registres inférieurs des matrices figurent tous deux Saint François d'Assise et sa disciple Sainte Claire. Le registre supérieur de la matrice n°115 présente une Nativité : la Vierge est allongée face à Joseph ; l'Enfant, le bœuf et l'âne sont gravés juste au-dessus. La légende mentionne : « + S'. ABBATISE. MON BEGINALI' NATIVITI' DNI IESV XPI BEATE CLARE DE AQUIS. ». La matrice n°152 présente le même registre inférieur. Le registre supérieur figure une Annonce au berger : le berger entouré de moutons et de végétation est désigné par un archange. La légende indique : « + S'. CONVENTVS. BEGINALI' MON NATIVITATI' IESV XPI BEATE CLARE D'AQUIS. ». Le couvent des Clarisses a été fondé en 1337 par la reine consort de Naples, Sancia. Les deux matrices qui nous intéressent sont contemporaines de la fondation du couvent, et ont probablement été commandées par la reine et conçues en Italie. Elles dénotent de l'influence de Giotto : leur fort naturalisme ne ressemble en rien à ce qui se fait à l'époque en France et dans le reste de l'Europe du Nord<sup>16</sup>. L'état de surface des deux matrices est relativement mat, très patiné.

Enfin le sceau de Guillaume de Hainaut, de grande dimension, daté du XIII<sup>ème</sup> siècle, présente une surface sombre et brillante.

#### 4.3.2 Etudes réalisées

Les trois matrices et le sceau présentés ont fait l'objet d'une étude comparative entre le scanner 3D et la station de microtopographie dont les résultats ont fait l'objet de la communication [149], dans laquelle les avantages et inconvénients des deux technologies ont été indiqués. La réalisation de scans 3D et de microtopographie nous ont aussi permis de produire des imprimés 2.5D des objets considérés : à partir du scan 3D, on extrait une cartographie des hauteurs via Blender™ (Figure C.2 43). Ce fichier est ensuite envoyé à l'imprimante. L'objet initial est une matrice de sceau, donc les gravures sont en creux. La cartographie des hauteurs visible en (b) Figure C.2 43 présente donc des zones claires qui correspondent aux creux et des zones foncées de hauteur supérieure. En inversant ce code couleur, on obtient l'image (c) de la Figure C.2 43, qui est le négatif de (b) : nous pouvons ainsi imprimer le sceau.

---

<sup>15</sup> Communication personnelle de la part de M. Clément Blanc-Rielh, des Archives nationales de Paris.

<sup>16</sup> Idem.

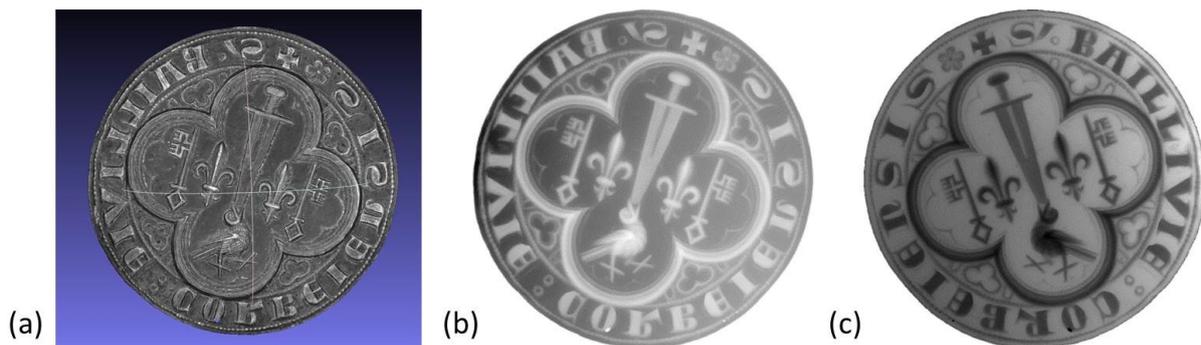


Figure C.2 43 – (a) Scan 3D réalisé sur la matrice de sceau n°124. (b) Carte des hauteurs tirée directement de ce scan et utilisée pour l’impression d’une matrice. (c) Carte des hauteurs déduites par inversion de (b) et utilisée pour l’impression d’un sceau.



Figure C.2 44 – Imprimés réalisés. (a) Matrice de sceau. (b) Matrice de sceau mate. (c) Sceau aspect cire rouge. (d) Sceau.

La Figure C.2 44 présente les imprimés réalisés. En (a) et (b), la cartographie en creux a été imprimée : nous avons recréé une matrice de sceau. L’imprimé (b) présente une couche blanche mate à piliers (de hauteur 80  $\mu\text{m}$ ) : l’aspect mat le rend plus lisible en supprimant les réflexions qui gênent l’observateur. En (c) et en (d), c’est la cartographie en plein qui a été imprimée : nous avons recréé un sceau. En (c), une couche couleur rouge a été ajoutée pour donner un l’aspect de surface proche de la cire ; l’imprimé ainsi produit est brillant, à la différence de (d), plus mat.

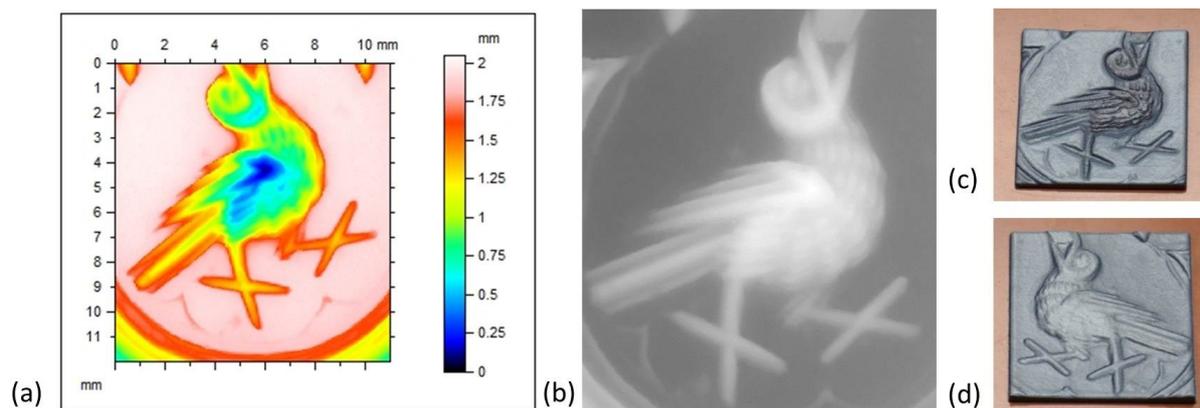


Figure C.2 45 – (a) Microtopographie réalisée sur l’oiseau de la matrice n°124. (b) Cartographie des hauteurs déduites du fichier scanné. (c) Imprimé en creux réalisé. (d) Imprimé en plein.

Un zoom a été réalisé en scannant un détail de la matrice avec la station de microtopographie. La zone choisie est celle de l’oiseau : 11 x 12 mm de côté, au pas de mesure 10  $\mu$ m (soit une mesure de 2 h 45 min). Ce scan est traduit en une carte des hauteurs, imprimée en creux ou en plein, ce qui est illustré par la Figure C.2 45. L’imprimé de la zone « zoomée » rend visible certains détails ignorés par le scan 3D et l’imprimé du sceau entier : les plumes du ventre de l’oiseau sont par exemple très visibles. La résolution du scanner 3D ne permet pas une telle finesse de détails.

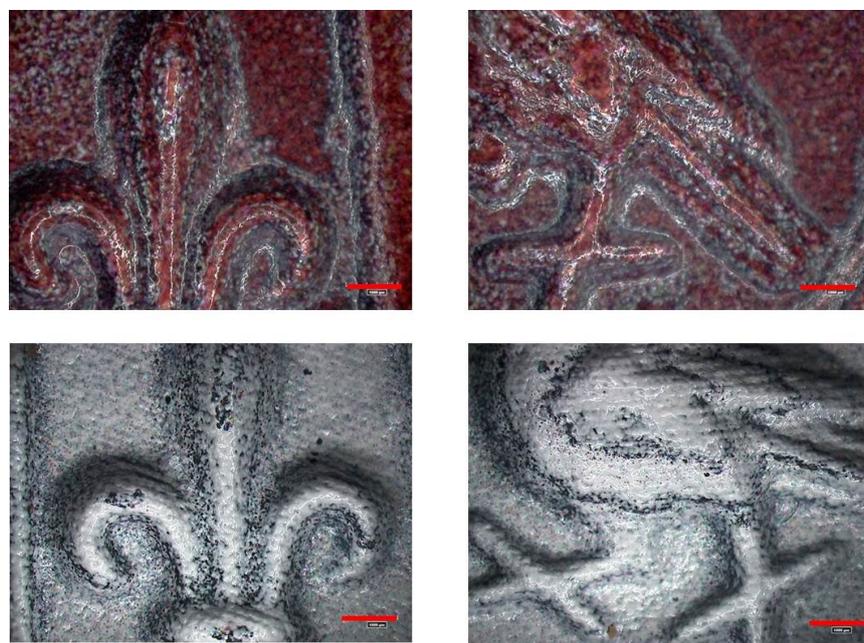


Figure C.2 46 – Vues sous microscope des imprimés « aspect cire rouge brillant » et « mat blanc », tous deux en plein. La barre d’échelle figure 1 mm.

La Figure C.2 46 montre les piliers blancs qui créent la sensation visuelle mate, et la différence zone à zone avec un imprimé brillant. Le relief et les détails sont plus visibles sur l’imprimé mat. La qualité des reproductions est intéressante : si les détails les plus fins ne sont

pas reproduits, les signes et la légende sont tout à fait lisibles. Les détails très fins de la gravure (par exemple les gravures sur le corps de l’oiseau) sont par contre rendus dans l’imprimé réalisé d’après la microtopographie (Figure C.2 45).

Le même travail a été réalisé sur les matrices n°115 et 152. La Figure C.2 47 présente les résultats obtenus pour la matrice n°115<sup>17</sup>.



Figure C.2 47 – Scan 3D, cartographies des hauteurs et imprimés réalisés (en plein et en creux) pour la matrice de sceau n°115.

**Remarque :** notons que le scanner 3D à lumière structurée n’est pas adapté à la surface brillant du sceau G. de H. : la Figure C.2 48 nous montre la différence entre un scan 3D et une microtopographie. Le scan n’est pas exploitable : les points non mesurés sont trop nombreux. La microtopographie en revanche est parfaitement lisible.

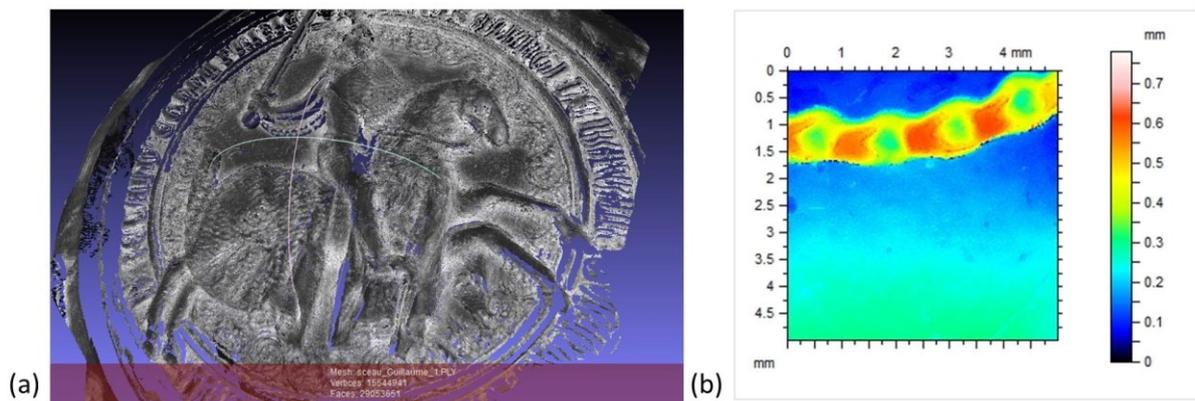


Figure C.2 48 – (a) Scan 3D réalisé sur le sceau en cire verte G. de H. (b) Microtopographie réalisée sur un détail de ce même sceau.

<sup>17</sup> Les questions relatives à ces deux matrices (ont-elles été gravées par le même artisan ? des poinçons ont-ils été utilisés ?) ont fait l’objet de la communication [149].

## 4.4 Conclusion

Nous avons utilisé les scans 3D pour imprimer des sceaux et des matrices de sceaux d'objets médiévaux. Ces impressions sont de bonne qualité ; réalisées avec un aspect de surface mat, elles sont très lisibles et pourraient être exploitées dans un cadre pédagogique, de recherche ou d'exposition. En combinant scan 3D à lumière structurée et microtopographie, on peut créer des imprimés de tout l'objet ainsi que des agrandissements de détails.

## 5. Le bestiaire médiéval pour les malvoyants

Une étude préliminaire sur les possibilités de la 2.5D pour la muséographie à destination des publics malvoyants a été entreprise ; en particulier, nous voulions considérer les aspects de surface brillant / mat et leur éventuelle application pour certaines formes de déficience visuelle. Claire Munuera-Ducoq, chargée d'actions culturelles à la Cité de l'Architecture, et moi avons pensé que les hauts ou bas-reliefs conservés au musée pouvaient former un intéressant support pour un essai d'impression en 2.5D, brillant et mat. Une personne malvoyante entraînée est capable de comprendre un relief conçu spécifiquement sur quelques niveaux et de le traduire en une image mentale : formes simples, animaux, visages, plans, cartographies, transcriptions d'œuvres, etc. Cette lecture se fait au toucher. Certaines personnes, atteintes de déficiences visuelles différentes, sont cependant sensibles à des différences de clarté, de luminosité ou de contraste des images. Ainsi, un dessin en noir et blanc accentué peut leur être lisible, tout comme une surface à deux niveaux brillants et mats. La technologie 2.5D, en permettant à la fois la création d'un relief et l'ajout d'une couche à deux niveaux de brillant, pourrait donner des imprimés à double usage : lecture tactile complétée d'une lecture en clarté pour plusieurs types de déficiences visuelles. Ajoutons que la micro-structure implémentée pour « faire du mat » donne une sensation tactile légèrement granuleuse, à la différence des surfaces brillantes lisses...

Parmi tous les bas-reliefs de la Cité de l'Architecture, nous en avons sélectionné certains représentants des animaux ou créatures mythiques médiévales : le cheval, la salamandre, le dragon, la licorne, le griffon...

### 5.1 Créer un relief « lisible sous les doigts »

Plusieurs questions se posent ici, relatives à l'impression et à l'acquisition de la forme des objets. Les imprimés que nous souhaitons produire sont à destination d'un public malvoyant ; le but n'est donc pas de reproduire tous les reliefs de l'objet, mais plutôt de créer plusieurs niveaux de relief adaptés à la compréhension de l'image. La Figure C.2 49 illustre le propos : sur cette Eve au jardin, 4 niveaux de relief (N1, N2, N3 et N4) pourraient suffire à signifier la figure humaine dans un jardin, détachée du fond.

Nous n'avons donc pas les contraintes sur le relief, la couleur et le brillant que nous avons dans les cas précédents. Ici, on cherche plutôt à créer un faux relief, de fausses couleurs et un faux brillant, qui soit lisible par plusieurs types de publics.



Figure C.2 49 – Haut-relief du linteau du portail nord de la cathédrale Saint-Lazare d’Autun, Eve dans le jardin du Paradis, moulage, 1125-1135. Image : M. Page, C2RMF, 2018.

L’acquisition de la forme des objets considérés n’a donc pas besoin d’être rigoureuse : les contours priment sur les hauteurs. C’est un atout dans un musée comme la Cité de l’Architecture, où les objets sont souvent placés très en hauteur, et ne peuvent être descendus : le scan 3D devient impossible. Nous devons par conséquent travailler à partir de simples photographies d’ensemble des objets, ou de dessins. Comment faire pour traduire une photographie en niveaux de hauteurs ?

## 5.2 L’exemple de la salamandre

La salamandre, animal légendaire qui vit dans le feu, est très présente dans l’imaginaire du Moyen-Age et de la Renaissance. Elle a été en particulier l’emblème du roi François Ier, ce qui en fait une créature omniprésente sur un grand nombre de moulages de la Cité de l’Architecture.

Les quelques photographies prises sur place le jour de ma visite au musée ne sont pas exploitables : leur contraste est trop faible pour que les contours de la salamandre soient détourables. Celles que l’on trouve en ligne sont au contraire trop contrastées ! Les ombres très marquées sont compréhensibles par un observateur mais pas par un calculateur numérique. Pour faire un premier essai, nous choisissons une méthode de dessin intermédiaire, à la main.

La photographie est imprimée en assez grand format, les formes dominantes sont décalquées puis scannées, et enfin les zones sont comblées par des aplats en niveaux de gris sur un logiciel de traitement d’image (Gimp™). La Figure C.2 50 illustre le propos.

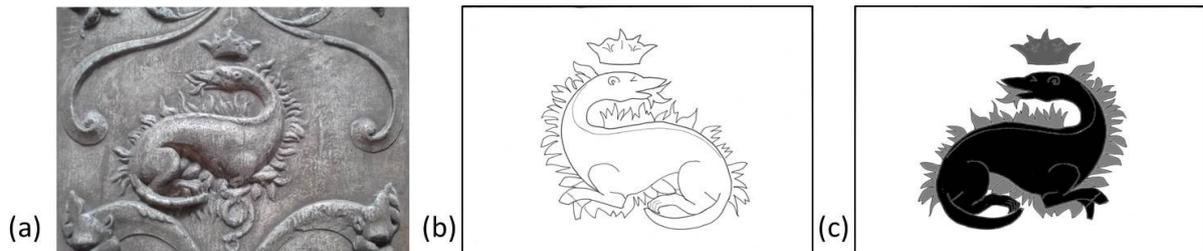


Figure C.2 50 – Essai « à la main ». (a) Photographie de mauvaise qualité d’une salamandre de la Cité de l’Architecture. (b) Scan du dessin effectué d’après la photographie. (c) Image numérique du dessin dont les formes sont remplies par des niveaux de gris représentant les hauteurs à imprimer. Images : M. Page, C2RMF, 2018.

L’image ainsi obtenue est imprimable. Il suffit de choisir une hauteur maximale ; les valeurs des niveaux de gris choisis pour remplir les formes donneront les hauteurs intermédiaires. Dans notre cas, nous avons 4 niveaux : le fond plat, les flammes, la couronne et le corps de la salamandre. Le résultat de l’imprimé est présenté Figure C.2 51.



Figure C.2 51 – A gauche : salamandre imprimée en 205 couches, sans effet de matité. A droite, structure blanche mate. Images : A. Maigret, C2RMF, 2018.

### 5.3 Perspectives

On peut donc créer :

- Un objet en 2.5D aux dimensions désirées, à plusieurs niveaux de reliefs, chacun de ces niveaux correspondant à un détail de l’image : par exemple, les flammes au niveau 1, la couronne au niveau 2, le corps de la salamandre au niveau 3. Trop de niveaux et de détails empêchent la lecture tactile de l’objet.
- Ce même objet peut présenter des variations en brillant qui viendront s’ajouter aux reliefs. Par exemple : les flammes mates, la couronne satinée, le corps de la

salamandre brillant. Certains déficients visuels qui perçoivent les contrastes en clarté pourraient être interpellés par ces décalages en brillant<sup>18</sup>.

## 6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre plusieurs applications de l'impression 2.5D d'objets mats relatives au domaine du patrimoine. Nous avons dans un premier temps créé des surfaces mates monochromatiques dont l'aspect ressemble visuellement au plâtre, ce qui nous a permis de mettre en pratique les algorithmes de calcul de la hauteur des piliers. Nous avons vu ensuite comment l'impression 2.5D pouvait aider le travail des restaurateurs textile et métal. En particulier, le cas du bronze a montré que l'impression 2.5D pouvait créer des surfaces texturées, mates et colorées qui s'insèrent sur un objet archéologique tout en étant visuellement détectables à une certaine distance d'observation, ce qui satisfait les conditions d'éthique de la restauration. Le projet sur les sceaux a démontré la pertinence du rendu mat pour des questions de lisibilité de petits objets, ainsi que la possibilité de créer des agrandissements imprimés de certaines zones, en combinant scan 3D (à la résolution 20 µm en x et y) et microtopographie (à la résolution 5 ou 10 µm en x et y). Enfin, nous pensons que cette technologie, qui permet de créer des reliefs brillants ou mats, pourrait trouver d'intéressantes applications en médiation culturelle et en muséographie, en particulier auprès des publics présentant des déficiences visuelles.

---

<sup>18</sup> Communication personnelle de la part de M. Arnaud Vallée, médiathèque Marguerite Yourcenar, et Mme Claire Munuera-Ducoq, Cité de l'Architecture.



# Conclusion générale

## 1. Rappel de la problématique

Le procédé d'impression en relief, dit « 2.5D », crée un objet en trois dimensions par la superposition de couches d'encre colorées. Comme pour un système d'impression couleur traditionnel, les encres utilisées sont les primaires Cyan, Magenta, Jaune et Noir, auxquelles s'ajoutent un canal d'encre blanche et un canal de vernis. La résolution de l'imprimante est de 450 pixels / pouce, ce qui permet la création d'un motif minimal de 56  $\mu\text{m}$  de côté. Le relief créé grâce au procédé additif est un bas-relief, à la différence des imprimantes dites « 3D » qui produisent des formes complètes. L'impression 2.5D permet donc la création d'objets originaux ou de répliques, en relief et colorés.

La présence des canaux d'encre blanche et de vernis, la possibilité de créer un relief allant d'une très petite amplitude (1.8  $\mu\text{m}$  au minimum) jusqu'à quelques centimètres, le principe additif de la machine et ses capacités couleurs laissent à penser que l'attribut de l'apparence « brillant » pourrait être maîtrisé. Il l'est déjà en partie : les études précédentes et le travail en interne des ingénieurs ont abouti à l'élaboration de protocoles qui permettent à la fois un contrôle des aspects brillants dans la gamme des brillants intermédiaires et la création d'une couche très brillante (mesurée à environ 100 GU). Mais qu'en est-il dans la gamme des brillants faibles ?

Non seulement une très large majorité des objets réels est mate, mais l'observateur humain est de plus très sensible aux aspects de surface de brillant faible : une petite variation en brillant, entre 2 GU et 3 GU par exemple, sera perçue, alors qu'une variation de même amplitude au milieu de la gamme (entre 41 et 42 GU par exemple) ne le sera pas. Ajoutons que dans le contexte actuel, les objets mats sont synonymes de qualité, ainsi que nous l'avons détaillé dans le chapitre A.1. Pour permettre la création d'objets originaux mats ainsi que la reproduction d'objets existants mats, nous devons arriver à maîtriser le rendu mat de l'imprimante.

Pour le moment, celle-ci pêche par son incapacité à créer des surfaces mates, pour une raison simple : les encres sont naturellement brillantes. Notre étude a donc eu pour objectif de réduire le brillant des surfaces imprimées, sans modifier la composition des encres.

## 2. Instrumentation

Plusieurs paramètres d'apparence sont entrés en jeu au cours de notre étude. Le brillant bien sûr, mais aussi la couleur, la texture visuelle, la structure physique, le scintillant et la forme.

Chacun d'entre eux a été mesuré avec une instrumentation spécifique. Pour la mesure du brillant, le glossmètre a montré qu'il était l'instrument adapté à la gamme des mats. Nous avons donc effectué essentiellement des mesures du brillant spéculaire à 60° avec un glossmètre. Le même instrument a été utilisé pour toute l'étude. Une expérience psychovisuelle met en regard les résultats du glossmètre avec un classement effectué par des observateurs. Les mesures au glossmètre ont aussi été complétées par des mesures de la structure physique – de la rugosité – effectuées avec une station de microtopographie. La résolution de la machine (1  $\mu\text{m}$  dans les directions latérales, 10 nm dans la direction verticale) est tout à fait adaptée aux imprimés produits. La texture visuelle est évaluée avec un appareil photographique, tout comme le scintillant, dont la mesure fait l'objet de débats actuels à la CIE et pour lequel nous avons adapté un protocole existant. La couleur est mesurée avec un spectrophotomètre adapté aux structures en léger relief (type textiles) et la forme avec un scanner 3D à lumière structurée (résolution latérale 20  $\mu\text{m}$ , résolution verticale 1  $\mu\text{m}$ ).

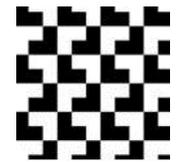
### **3. Etudes réalisées et résultats**

Plusieurs études distinctes ont été réalisées. Dans le chapitre B.1, nous nous sommes intéressés au brillant et à la rugosité de surfaces simples, pour lesquelles seuls les paramètres d'impression variaient. Ces paramètres sont initialement nombreux, mais certains ont pu être fixés. Ainsi, il est préférable d'orienter les motifs à imprimer dans le sens du mouvement du chariot, ce qui limite les déformations liées à la chute des gouttes et à la vitesse d'impression. Le temps de séchage n'ayant pas d'influence sur le brillant, il peut être lui aussi fixé à sa valeur minimale. La couleur de l'encre est fixée au cyan, qui se mesure facilement en microtopographie et qui s'est révélé de meilleure qualité que les autres encres : en particulier, il est beaucoup moins fluide que le magenta, qui s'étale trop. Le système peut ainsi être réduit à l'unique étude de la variable « taille de goutte ». En effet, nous pouvons choisir entre 6 tailles de gouttes lors d'une impression, ce qui signifie que la goutte déposée fera entre 1.8  $\mu\text{m}$  de haut (pour le niveau 1) et 10.8  $\mu\text{m}$  (pour le niveau 6). Plus la goutte est grosse, et plus l'encre s'étale, ce qui augmente le niveau de brillant des imprimés. A petites gouttes, le brillant est modéré. En dehors de la résolution de l'imprimante, la taille des gouttes est le paramètre déterminant pour la suite de notre étude. Ce chapitre B.1 est propre au système d'impression 2.5D que nous avons utilisé.

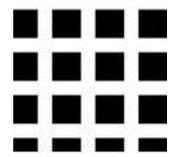
Le chapitre B.2 en revanche peut s'étendre à n'importe quel procédé d'impression en relief. Nous y présentons la méthode d'analyse que nous avons utilisée pour évaluer les performances de l'imprimante en hauteurs. Il apparaît qu'au-delà d'une certaine fréquence (70 cycles / pouce pour les petites gouttes), les performances de l'imprimante chutent selon une fonction que nous avons modélisée. La plus petite taille de gouttes est à nouveau la plus intéressante : elle donne les meilleures performances en relief, la forme des imprimés étant la plus proche de la commande. Grâce à la modélisation effectuée, nous avons pu compenser les résultats obtenus pour la taille de gouttes 1, ce qui a augmenté la fréquence de coupure, mais dégradé les hauteurs atteintes. Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre B.2, plusieurs limites nuancent notre propos. D'autres méthodes de filtrage, associées à un meilleur calcul du ratio signal sur bruit, donneraient peut-être un meilleur résultat.

La méthode, testée sur un très grand nombre d'échantillons, ce qui la rend difficile à mettre en place, peut toutefois être adaptée sur un bien plus petit nombre d'imprimés. Elle est donc un outil pertinent pour l'évaluation de la qualité de la réponse en hauteurs d'une encre, d'un motif ou d'un paramètre, et ceci sur tout type d'imprimante en relief (à condition de disposer d'un outil de mesure des hauteurs). En revanche, nous avons vu que la seule variation en fréquence sur un motif simple (ici des lignes) ne suffit pas à diminuer nettement l'aspect brillant des imprimés. Pour descendre vers le mat, les structures spatiales à une dimension ne suffisent pas ; hauteurs et fréquences vont devoir varier conjointement.

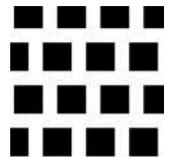
Des microstructures à deux dimensions latérales et une dimension verticale ont donc été implémentées. Leur étude fait l'objet du chapitre B.3. En faisant varier la hauteur des configurations spatiales créées à l'échelle de la dizaine de micromètres, on s'aperçoit que le brillant diminue de manière nette. Toutes les configurations n'ont pas le même comportement : certaines d'entre elles, composées de micro-piliers de dimensions faibles (56  $\mu\text{m}$  de côté, à la limite de la résolution, au plus petit niveau de gouttes), ne permettent pas la diminution en brillant : leurs piliers sont trop étroits pour que le motif se construise. En termes de rugosité, cela se traduit simplement par le fait que les piliers étroits, étalés, ont une rugosité faible, donc un brillant plus élevé que les piliers larges, dont la rugosité se maintient suffisamment pour que le brillant diminue. Il est apparu expérimentalement que la diminution du brillant se modélisait pour trois configurations particulières, que nous avons appelées E, G et I (rappelées ci-contre). G et I présentent des piliers de 112  $\mu\text{m}$  de côté, répartis périodiquement. Les piliers de la configuration E sont plus rapprochés mais moins larges. En faisant varier uniquement la hauteur à laquelle ces structures sont imprimées, on s'aperçoit que pour ces trois configurations, la courbe représentant le brillant spéculaire à 60° en fonction de la hauteur suit un schéma modélisable par une fonction  $\ln$ . La configuration I est la plus intéressante : elle permet le contrôle du brillant dans la gamme [1 – 8 GU], ce qui est un peu plus mat que E, et sa texture visuelle est moins visible que celle de G, trop régulière. Une expérience psycho-visuelle préliminaire a montré que les observateurs étaient sensibles aux variations en brillant que nous mesurons au glossmètre ; la configuration I imprimée à la hauteur 80  $\mu\text{m}$  est apparue comme la plus mate entre celles que nous avons proposées aux participants (à une distance d'observation proche, les imprimés étant manipulés par les observateurs). Nous avons donc conservé cette hauteur pour la suite de l'étude.



E



G



I

Cependant toute l'étude du chapitre B.3 s'est faite sur des imprimés monochromatiques. Pour envisager la création ou la reproduction d'objets mats, il faut pourtant considérer l'attribut couleur. Les expériences du chapitre B.4 ont eu pour objectif d'évaluer l'influence de la couleur sur le brillant, et celle de la microstructure sur la couleur. Nous avons ainsi intégré la microstructure I dans un protocole d'impression classique, sous une couche couleur. En travaillant sur des imprimés couleur à deux encres, puis à trois encres, nous avons construit un espace où le brillant est modélisé en fonction des pourcentages relatifs en encre Cyan,

Magenta, Jaune et Noir. En combinant ces résultats avec ceux du chapitre précédent, nous pouvons déterminer, pour une combinaison d'encre donnée, quelle hauteur de piliers doit être implémentée pour produire la sensation mate désirée. Ceci répond à la problématique de l'uniformisation des niveaux de brillant colorés. Les méthodes et protocoles décrits dans les chapitre B.3 et B.4 peuvent être adaptés sur tout système d'impression permettant la création d'un relief et l'application d'une couche couleur.

## 4. Limites et perspectives

### 4.1 Du point de vue industriel

Cette étude a démontré que la structuration astucieuse des sous-couches d'encre blanche permettait d'obtenir un imprimé coloré mat. Tout notre travail s'insère dans les protocoles d'impression existant : il suffit d'ajouter la couche qui contient l'information sur le niveau de brillant et de connaître les pourcentages relatifs en encre. Pour cela, la réalisation d'un profil ICC (qui fait la conversion entre valeurs  $L^*$ ,  $a^*$  et  $b^*$  et taux de couverture en primaires *CMJN*) s'avère indispensable ; le profil ICC à 5 dimensions, le brillant étant ajouté aux primaires, devient même la prochaine étape.

De manière générale, il serait plus simple d'imaginer un dispositif d'impression pourvu de 5 nouveaux canaux d'encre cyan, magenta, jaune, noire et blanche mates. Produire des colorations mates n'est pas aisé, mais l'ajout d'une base granuleuse (comme la fécule dans un vernis) ou d'un composé très absorbant (comme les nanoparticules de carbone du Vantablack™ noir) produirait peut-être l'effet souhaité. Si cela n'est pas possible, la structuration de la surface reste la solution la plus efficace avec un système d'impression additif. Elle est principalement limitée par la résolution de l'imprimante.

Un point à soulever est qu'en étant fixée à 450 pixels / pouce, la résolution actuelle ne permet pas de reproduire des objets directement en scannant leur rugosité de surface et en l'imprimant. L'acquisition de la rugosité au moyen de la station de microtopographie ne pose pas de problème (hormis la longueur des temps d'acquisition), mais sa reproduction n'est pas possible : les détails sont souvent bien inférieurs aux 56  $\mu\text{m}$  minimum imprimables. C'est pourquoi nous devons « tricher visuellement » en proposant des motifs particuliers qui permettent le contrôle des aspects de surface. Nous proposons ainsi une sorte de métamérisme de brillant : deux rugosités et deux matières différentes présentent le même rendu d'apparence, observés à une certaine distance et sous un éclairage diffus. Modifier la résolution de l'imprimante rendrait éventuellement nos propositions caduques, même s'il n'est pas certain que la viscosité des encres permette actuellement la création de microstructures plus fines.

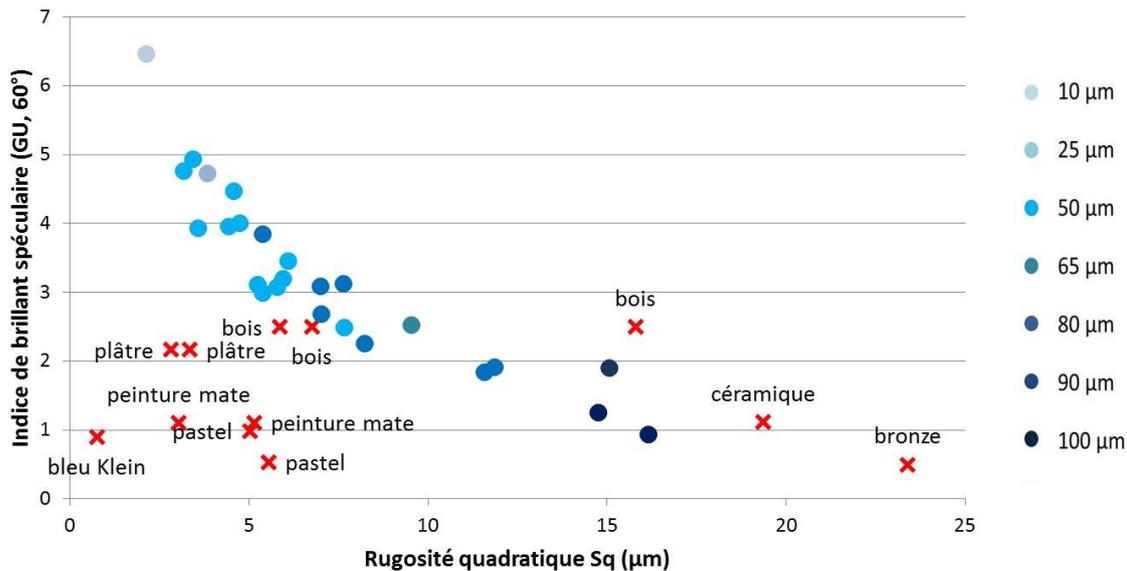


Figure – Brillant spéculaire et rugosité quadratique d'objets réels, placés en regard des possibilités actuelles de l'imprimante. Le brillant de certains imprimés est dans la même gamme que celui des objets réels, mais il n'est pas certain que le mimétisme soit bon, la rugosité étant différente.

En changeant la résolution de l'imprimante, la création d'autres structures, indiscernables visuellement, ou d'autres formes que les piliers (comme les cônes, construits sur plusieurs pixels), ainsi que la génération de micro-facettes contrôlées ou de structures aléatoires deviennent possible.

## 4.2 Du point de vue métrologique

Plusieurs points propres à la mesure du brillant et de la rugosité ont été soulevés dans ce travail. Le glossmètre a montré qu'il était pour le moment le seul instrument adapté à la mesure des aspects de surface mats. La mesure de la BRDF n'est pas envisageable : les grands instruments (comme le CONDOR du Cnam) ne sont pas calibrés pour la mesure du mat, et les instruments portables ne permettent pas une discrimination facile des échantillons. La réalisation de photographies à haute résolution a permis de différencier les états de surface, et peut-être est-ce là une piste plus raisonnable pour la mesure du brillant parasite ou du scintillant : on peut imaginer développer des protocoles de traitement de l'image sur une acquisition photographique simple, qui serait mise en regard avec des résultats de tests psycho-visuels. Le scintillant en particulier reste à étudier. Nous avons vu dans le chapitre B.3 qu'il posait problème sur nos imprimés, à cause des encres et de la présence des piliers qui créent des micro-facettes réfléchissantes. La stratégie I minimise cet effet, mais la question reste ouverte : en particulier, l'ajout d'une couche couleur sur la microstructure recrée du scintillant.

De plus, maintenant que nous pouvons produire des échantillons très mats de manière maîtrisée, il serait pertinent de conduire une « vraie » expérience psycho-visuelle, dans une cabine à éclairage contrôlé, avec plus de participants, afin de conclure sur l'aspect réaliste des imprimés réalisés.

### 4.3 Imprimer un brillant, imprimer une BRDF, imprimer un matériau

A la fin de ce travail, nous arrivons à imprimer un niveau de brillant donné, dans la gamme des mats. Pour cela, on considère séparément les données d'apparence, à savoir le brillant et la couleur. La rugosité imprimée n'est donc pas celle de l'objet à reproduire, mais celle qui produira le brillant de l'objet, comme nous l'avons l'indiqué. La prochaine étape consiste en l'impression d'un matériau directement via sa BRDF. Pour cela, il faut bien sûr que la BRDF contienne l'information sur le mat (mettons de côté le problème de l'instrumentation). Puisque l'on connaît la répartition des micro-facettes théoriques sur la surface, ainsi que la répartition réelle des micro-facettes sur l'imprimé (grâce à un scan de rugosité), il devient aisé de les relier à la BRDF mesurée sur l'imprimé. En comparant la BRDF mesurée à une BRDF désirée – celle d'un objet réel par exemple – on pourrait imaginer l'optimisation numérique des micro-facettes pour qu'elles produisent une telle BRDF. A la différence de certains travaux de recherche dont la démarche est similaire (cités en fin de chapitre A.2), ici un unique système d'impression produirait l'ensemble de l'apparence de l'objet.

### 4.4 Rhéologie

Enfin, une partie de nos résultats ne pourra être complètement expliqué qu'en changeant de point de vue et en explorant l'influence de différents paramètres rhéologiques sur le brillant. En particulier, l'influence des propriétés des encres (viscosité, tension superficielle, influence de la température...) est à étudier pour comprendre notamment pourquoi le brillant des mélanges colorés est inférieur au brillant des encres pures. L'élargissement mécanique (*dot gain*) paraît aussi pertinent ; son étude, couplé à l'étude fréquentielle en relief, donnerait probablement des résultats intéressants.

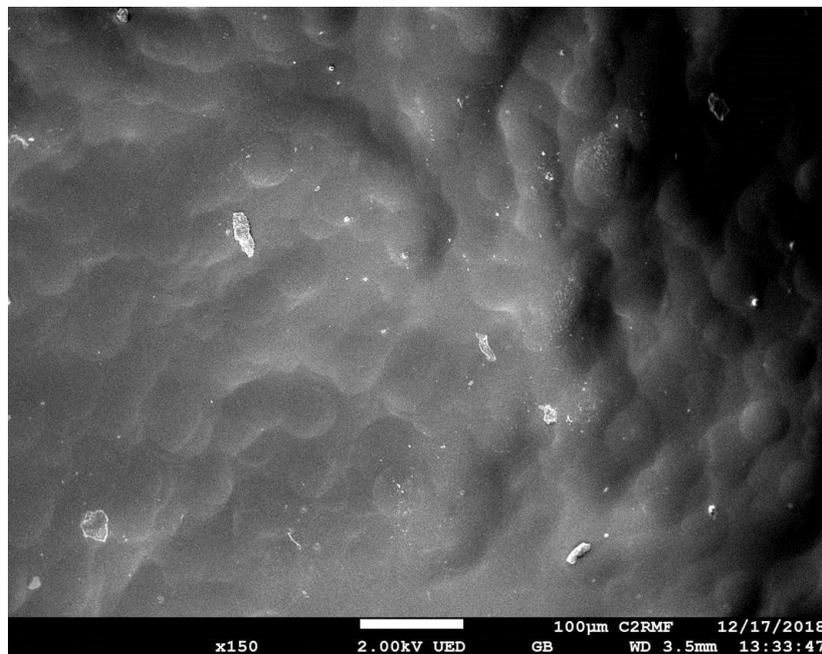


Figure – Vue sous microscope à balayage électronique d'une couche d'encre imprimée au niveau de gouttes 5. Les gouttes d'encre ne coagulent pas : elles sont superposées les unes aux autres, et la couche est rugueuse.

## **5. Applications au domaine du patrimoine**

L'ensemble de notre travail technique nous a permis d'envisager la reproduction d'objets issus du domaine du patrimoine. Il nous a fallu pour cela maîtriser la chaîne d'acquisition des paramètres d'apparence d'un objet réel : nous avons travaillé avec différentes instrumentations (photographie, scan 3D, microtopographie, spectrophotométrie, glossmètre). L'impression relief trouve dans le domaine du patrimoine de nombreuses applications : elle vient compléter ou remplacer l'impression 3D ou les méthodes de restauration traditionnelles sur certains points particuliers. Le comblement de lacunes sur certains types d'objets, archéologiques notamment, est une piste que nous avons explorée. Les imprimés réalisés, structurés, mats et colorés, peuvent s'insérer dans un protocole de restauration ; ils sont détectables à une certaine distance, ce qui est conforme aux règles de lisibilité des retouches. La création de surfaces mates trouve d'autres applications que la reproduction de textures : muséographie, problématiques de conservation, matériaux-thèque, médiation culturelle, etc.

## **6. Conclusion**

Ainsi le mat, défini comme l'absence de reflets brillants, s'est révélé un pan d'étude riche et passionnant : du point de vue esthétique, lexicologique, optique, perceptuel et technologique, les aspects de surface mats restent un sujet d'étude actuel et pertinent.

La question sur laquelle nous avons ouvert ce travail était la suivante : comment générer des surfaces mates avec un seul matériau (brillant) : l'encre ? Sans modifier la composition des encres, nous avons vu que la seule solution pour diminuer leur brillant naturel est de les structurer à micro-échelle. En augmentant la rugosité des imprimés, à une échelle presque indiscernable à l'œil, nous diminuons leur brillant. Nous arrivons ainsi à contrôler le rendu mat en modifiant uniquement la hauteur à laquelle les microstructures sont imprimées.

La technologie 2.5D, adaptée au domaine du patrimoine, devrait trouver d'autres applications. Les protocoles que nous avons développés pour créer de la couleur mate sont adaptables à d'autres procédés d'impression ou de création de relief, tout comme les méthodes et instrumentations mises en place pour la mesure de l'apparence.



# Bibliographie

- [1] DELAY, N. *Le Japon éternel*. Paris : Gallimard, 1998, 160 p.
- [2] *La Bible*. Traduction du texte original par les membres du rabbinat français, sous la direction du grand rabbin Z. Kahn. Paris : éditions Colbo, 2015, 1222 p.
- [3] Saint François d'Assise. *Cantique des Créatures*. Traduction proposée sur le site collectif Wikipédia.
- [4] BRAMLY, S. *La Transparence et le Reflet*. Paris : ed. J.-C. Lattès, 2016, 552 p.
- [5] Collectif. *Le Nouveau Petit Robert de la Langue française*. Paris : Le Robert, 2008.
- [6] GENOUVRIER, E. *Dictionnaire des synonymes*, Paris : Larousse, 2007.
- [7] Collectif. *Le Livre de l'Or*. Réunion des Musées Nationaux, publications spéciales du Metropolitan Museum of Art, 1998.
- [8] Site internet du Musée du Louvre. [novembre 2017], [www.louvre.fr/oeuvre-notices/portrait-de-femme-dite-l-europeenne](http://www.louvre.fr/oeuvre-notices/portrait-de-femme-dite-l-europeenne).
- [9] Collectif. *Dictionnaire étymologique du français*. Paris : Le Robert, 2003.
- [10] GAFFIOT, F. *Dictionnaire Latin-Français*. Paris : Hachette, 2002.
- [11] Collectif. *Dictionnaire allemand*. Harrap's, 2008.
- [12] Collectif. *Dictionnaire anglais*, Harrap's, 2008.
- [13] GIONO, J. *Que ma joie demeure*. Le livre de poche, 1974, 416 p.
- [14] HUGO, V. *Les travailleurs de la mer*. Paris : Gallimard, collection Folio Classique, 640 p.
- [15] APOLLINAIRE, G. *Alcools*. Gallimard, 2012, 190 p.
- [16] COSS, R. G. *All that Glistens: Water Connotations in Surface Finishes*. *Ecological Psychology*, 2010, 2:4, 367-380.

- [17] COSS, R. G., RUFF S., SIMMS, T. *All That Glistens: II. The Effects of Reflective Surface Finishes on the Mouthing Activity of Infants and Toddlers*. *Ecological Psychology*, 2010, 15:3, 197-213.
- [18] MEERT, K., PANDELAERE, M., PATRICK, V. M. *Taking a shine to it: How the preference for glossy stems from an innate need for water*. *Journal of Consumer Psychology*, 2014, 24, 195–206.
- [19] SHEPHARD, T.V., LEA, S.E.G., HEMPEL DE IBARRA, N. *'The thieving magpie'?* *No evidence for attraction to shiny objects*. *Animal Cognition*, 2015, 18:393.
- [20] LANTHONY, P. *Lumière, Vision, Peinture*. Paris : Citadelles & Mazenod, 2009, 191 p.
- [21] Site internet de Tollens. [septembre 2017], [www.tollens.com](http://www.tollens.com).
- [22] Planétoscope. [mai 2018], [www.planetoscope.com](http://www.planetoscope.com).
- [23] Blog de design. [décembre 2017], [gizmodo.com/5870924/i-hate-glossy-gadgets](http://gizmodo.com/5870924/i-hate-glossy-gadgets).
- [24] PERRAULT, C. *Griselidis*, dans *Contes*. Garnier-Flammarion, 1991.
- [25] Exposition Balenciaga, l'Œuvre au Noir, Saison espagnole – Hors les murs du Palais Galliera au musée Bourdelle, printemps 2017. Commissaire Véronique Belloir et scénographie Olivier Saillard.
- [26] DI STEFANO, E. *Gustav Klimt, L'or de la Séduction*. Gründ, 2007.
- [27] PASTOUREAU, M. *Le noir, histoire d'une couleur*. Editions du Seuil, 2008, 216 p.
- [28] BULMAN, J.C. *L'habit en révolution : mode et vêtement dans la France d'Ancien Régime*. Boston College Electronic Thesis Dissertation, 2008, p.18, cité par VIGARELLO, G. *La Robe*. Editions du Seuil, 2017, 216 p.
- [29] PPG peinture. [mai 2018], cité par [news.autojournal.fr](http://news.autojournal.fr).
- [30] Saint-Gobain. [janvier 2018], [fr.saint-gobain-building-glass.com](http://fr.saint-gobain-building-glass.com).
- [31] Site des Nouvelles Technologie NóxTon. [octobre 2017], [noxton.com](http://noxton.com).
- [32] GED, G. *Métrologie du brillant : développement et caractérisation psychophysique d'échelles de brillants*. Thèse, Conservatoire national des arts et métiers, 2017, 259 p.

- [33] TURBIL, C., GOZHYK, I., TEISSEIRE, J., SIMONSEN, I., GED, G., OBEIN, G. Predicting Changes in visual Appearance of periodic Surface from BRDF Measurements. In : *4<sup>th</sup> CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance, Prague, République Tchèque, 2016*, p. 103-110.
- [34] Dossier de presse 2018 du musée Lalique. [décembre 2017], [musee-lalique.com](http://musee-lalique.com).
- [35] BERNARD, G. *Implication de la concentration volumique pigmentaire dans l'étude de la pulvérulence des couches picturales mates*. Mémoire de Master 2, Université Paris 1, 2017, 134 p.
- [36] Surrey Nanosystems [mars 2016], [surreynanosystems.com](http://surreynanosystems.com).
- [37] Blog sur l'impression photographique. [septembre 2017], [blog.veoprint.com](http://blog.veoprint.com).
- [38] RIESS, L. « *La Galissonnière à Brest.* » *Etude et conservation-restauration d'un lot de photographies gélatino-argentiques du Musée national de la marine (1931, Paris). Recherche d'une méthode de dévernissage adaptée*. Diplôme de restaurateur national du patrimoine, Institut national du patrimoine, 2017.
- [39] Commission Internationale de l'Eclairage. *A framework for the measurement of appearance*. Rapport technique CIE 175, 2006.
- [40] CHUBB, C., OLZAK, L., DERRINGTON, A. *Second-order processes in vision: Introduction*. *Journal of Optical Society of America*, 2001, A. 18. 9. 2175-2178.
- [41] ELIAS, M., LAFAIT, J. *La couleur. Lumière, vision et matériaux*. Paris : Belin, 2006, 350 p.
- [42] ZORLL, U. *New aspects of gloss of paint film and its measurement*, *Progress in Organic Coatings*, 1972, 1, 113-155.
- [43] ROIRE, J. *Le brillant, le mat. Leurs mesures ? Science et Technologie de la Conservation et de la Restauration des œuvres d'art et du patrimoine*, 2, 1991.
- [44] OBEIN, G. *Caractérisation optique et visuelle du brillant*. Thèse de doctorat, Conservatoire national des arts et métiers, 2003, 172 p.
- [45] HUNTER, R.S. *Methods of determining gloss*. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1937, 18.
- [46] Commission Internationale de l'Eclairage. *International Lighting Vocabulary, 3<sup>rd</sup> edition*. Publication 17, CIE, 1970, p.81.
- [47] Commission Internationale de l'Eclairage. *International Lighting Vocabulary, 4<sup>th</sup> edition*. Publication 17, CIE, 1984.

- [48] Organisation Internationale de Normalisation. *Paints and varnishes – Determination of specular gloss of non-metallic paint films at 20°, 60° and 85°*. ISO 2813:2000, ISO, Genève, Suisse, 2000.
- [49] HUNTER, R.S. *A glossmeter for Smoothness Comparisons of Machine-Finished Surfaces*. *Journal of the Optical Society of America*, 1946, 36, 3, 4 p.
- [50] LELOUP, F., AUDENAERT J., HANSELAER, P. Investigation of inter-instrument agreement of specular glossmeters. In *Proceedings of the CIE 28<sup>th</sup> Session*, CIE, Manchester, juin 2015. CIE, 1, 407-414.
- [51] BUDDE, W. *The calibration of gloss reference standards*. *Metrologia*, 16(2):89, 1980.
- [52] OBEIN, G., KNOBLAUCH, K., VIÉNOT, F. *Difference scaling of gloss: Nonlinearity, binocularity and constancy*. *Journal of Vision*, 2004, 4, 711-720.
- [53] HUNTER, R.S., JUDD, D. *Development of a method of classifying paints according to gloss*. *ASTM Bulletin*, 1939, 11-18.
- [54] VAN ASSEN, J.J.R., WIJNTJES, M.W.A., PONT, S.C. *Highlight shapes and perception of gloss for real and photographed objects*. *Journal of Vision*, 2016, 16(6):6, 1-14.
- [55] LELOUP, F.B., POINTER, M.R., DUTRÉ, P., HANSELAER, P. *Geometry of illumination, luminance contrast, and gloss perception*. *Journal of the Optical Society of America*, 2010, 27, 9, 2046-2054.
- [56] BACK, J., PRAZDNY, S. *Highlights and the perception of glossiness*. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 1981, 30(4), 407-410.
- [57] KIM, J., MARLOW, P.J., ANDERSON, B.L. *Texture-shading flow interactions and perceived reflectance*. *Journal of Vision*, 2014, 14(7):1, 1-19.
- [58] HANSMANN-ROTH, S., PONT S.C., MAMASSIAN, P. *Contextual effects on real bicolored glossy surfaces*. *Journal of Vision*, 2017, 17(2):17, 1-13.
- [59] HARRISON, V.G.W., POULTER, S.R.C. *Gloss measurement of papers-the effect of luminance factor*. *British Journal of Applied Physics*, 1951, 2, 4, p. 92.
- [60] CHADWICK, A.C., KENTRIDGE, R.W. *The perception of gloss: a review*. *Vision research*, 2015, 109, p. 221-235.
- [61] RODOLFO, J. *Cours de métrologie optique*. Institut d'Optique Graduate School, 2015.
- [62] INSA Lyon : les grandes familles de filtres. [mai 2015], [mip2.insa-lyon.fr/Etats%20de%20surface/instrument/filtres/familles.htm#11562](http://mip2.insa-lyon.fr/Etats%20de%20surface/instrument/filtres/familles.htm#11562).
- [63] Centrale Lille. [mai 2015].
- [64] PAGE, M. *Etude comparative de la microscopie numérique 3D et de la microtopographie*. Mémoire de master, Institut d'Optique Graduate School, 2015, 120 p.

- [65] Organisation Internationale de Normalisation. Spécification géométrique des produits – Etat de surface : Méthode du profil – Caractéristiques métrologiques des filtres à phase correcte. ISO 11562:1996, ISO, Genève, Suisse, 1996.
- [66] Organisation Internationale de Normalisation. Spécification géométrique des produits (GPS) – Filtrage – Partie 21 : Filtres de profils linéaires, Filtres gaussiens. ISO 16610-21:2011, ISO, Genève, Suisse, 2011.
- [67] Organisation Internationale de Normalisation. Spécification géométrique des produits (GPS) – Filtrage – Partie 61 : Filtres surfaciques linéaires, Filtres gaussiens. ISO 16610-61:2015, ISO, Genève, Suisse, 2015.
- [68] ZANI, M.L. *La mesure de rugosité ? Quelques normes...et plusieurs dizaines de paramètres.* MESURES, 2003, 758, 59-63.
- [69] Organisation Internationale de Normalisation. *Spécifications géométriques des produits – Etat de surface : Méthode du profil – Termes, définitions et paramètres d'état de surface.* ISO 4287:1997, ISO, Genève, Suisse, 1997.
- [70] Organisation Internationale de Normalisation. *Spécifications géométriques des produits (GPS) – Etat de surface : Surfacique.* ISO 25178, ISO, Genève, Suisse, 2016.
- [71] Organisation Internationale de Normalisation. *Spécifications géométriques des produits (GPS) – Planéité – Partie 2 : Opérateurs de spécification.* ISO 12781-2 :2011, ISO, Genève, Suisse, 2011.
- [72] KARRER, J.M. La mesure des états de surface. [mai 2015], [jm.karrer.free.fr/documents/ES1.pdf](http://jm.karrer.free.fr/documents/ES1.pdf).
- [73] *Tribology for Scientists and Engineers. From Basics to Advanced Concepts.* Menezes, P., Ingole, S.P., Nosonovsky, M., Kailas, S.V., Lovell, M.R., 2013.
- [74] SILVESTRI, Z. *Caractérisation physico-chimique des étalons de masse.* Thèse de doctorat, Conservatoire national des arts et métiers, 2005, 212 p.
- [75] ZERROUKI, C., MISEREY, F., PINOT, P. *Répartition angulaire de la lumière diffuse par un échantillon poli du super-alliage CoCrWNi (Alacrite XSH) ; application à la détermination des paramètres statistiques caractérisant la rugosité superficielle.* Eur. Phys. AP., 1998, 1, 253-259.
- [76] DEUMIÉ, C., GIOVANNI, H., AMRA, C. *Angle-resolved ellipsometry of light scattering : discrimination of surface and bulk effects in substrates and optical coatings.* Applied Optics, 2002, 41, 3362-3369.
- [77] OGILVY, J.A. *Theory of wave scattering from random rough surfaces,* Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1991.
- [78] SIMONOT, L., ELIAS, M. *Color change due to surface state modification.* Color Research and Applications, 2003, 28, 45-49.

- [79] STIL SA. [avril 2015], <http://www.stilsa.com>.
- [80] COOK, R.L., TORRANCE, K.E. A reflectance model for computer graphics. *ACM Transactions on Graphics*, 1981, 15(3), 307-316.
- [81] TORRANCE, K.E., SPARROW, E.M. *Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces*. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(9), 1105-1114.
- [82] CALLET, P., Ecole Centrale Paris, cité par HEBERT, M. *Radiometric Properties of Surfaces*, 2015, Institut d'Optique Graduate School.
- [83] NAYAR, S.K., OREN, M. *Visual Appearance of Matte Surfaces*. *Science*, 1995, 267.
- [84] ASHIKMIN, M., PREMOŽE, S., SHIRLEY, P. A microfacet-based BRDF generator. *SIGGRAPH'00*, 2000, 65-74.
- [85] SIMONOT, L. *Photometric model of diffuse surfaces described as a distribution of interfaced Lambertian facets*. *Applied optics*, 2009, 48, 30, p. 5793-5801.
- [86] WEYRICH, T., PEERS, P., MATUSIK, W., RUSINKIEWICZ, S. Fabricating microgeometry for custom surface reflectance. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(3).
- [87] MATUSIK, W., AJDIN, B., GU, J., LAWRENCE, J., LENSCH, H., PELLACINI, F., RUSINKIEWICZ, S. Printing spatially-varying reflectance. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(5).
- [88] HAŠAN, M., FUCHS, M., MATUSIK, W., PFISTER, H., RUSINKIEWICZ, S. Physical reproduction of materials with specified subsurface scattering. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(4).
- [89] NICODEMUS, F.E., RICHMOND, J.C., HSIA, J.J., GINSBERG, I.W., LIMPERIS, T. *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*. National Bureau of Standards, US Department of Commerce, 1977, vol. 60.
- [90] DONG, Y., WANG, J., PELLACINI, F., TONG, X., GUO, B. Fabricating spatially-varying subsurface scattering. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(4).
- [91] MALZBENDER, T., SAMADANI, R., SCHER, S., CRUME, A., DUNN, D., DAVIS, J. Printing reflectance functions. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(3).
- [92] LAN, Y., DONG, Y., PELLACINI, F., TONG, X. Bi-scale appearance fabrication. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(4).
- [93] Site internet Sculpteo. [février 2016], [www.sculpteo.com/fr/impression-3d/technologies-dimpression-3d/](http://www.sculpteo.com/fr/impression-3d/technologies-dimpression-3d/).
- [94] Site internet consacré au digital. [février 2016], [www.lesnumeriques.com/imprimante-3d/impression-3d-differents-procedes-a1876.html](http://www.lesnumeriques.com/imprimante-3d/impression-3d-differents-procedes-a1876.html).

- [95] Comparateur en ligne d'imprimantes 3D. [février 2016], [www.aniwaa.fr/les-technologies-dimpression-3d/](http://www.aniwaa.fr/les-technologies-dimpression-3d/).
- [96] Vidéos mises en ligne par HP. [avril 2018], [www.youtube.com/watch?v=VXnt13ff5tc](http://www.youtube.com/watch?v=VXnt13ff5tc).
- [97] Site internet consacré au digital. [février 2016], [www.imaging-resource.com/news/2015/09/21/2d-printing-is-so-2015-canon-shows-rd-tech-that-prints-real-looking-texture](http://www.imaging-resource.com/news/2015/09/21/2d-printing-is-so-2015-canon-shows-rd-tech-that-prints-real-looking-texture).
- [98] Site internet consacré aux technologies 3D. [février 2016], [www.3dnatives.com/2-5d-printing-futur-impression-3d/](http://www.3dnatives.com/2-5d-printing-futur-impression-3d/).
- [99] BAAR, T., *Optimisation of print quality with multi-channel printing*. Thèse, Télécom ParisTech, 2015, 121 p.
- [100] SOLTMAN, D., SUBRAMANIAN, V. *Inkjet-printed line morphologies and temperature control of the coffee ring effect*. *Langmuir*, 2008, 24(5), 2224-2231.
- [101] ZHANG, X., KASHTI, T., KELLA, D., FRANK, T., SHAKED, D., ULICHNEY, R., FISCHER, M., ALLEBACH, J.P. *Measuring the Modulation Transfer Function of Image Capture Devices: What Do the Numbers Really Mean?* In *Image Quality and System Performance IX*, 8293, p.829307. International Society for Optics and Photonics.
- [102] COLTMAN, J.W. *The Specification of imaging properties by response to a sine wave input*. *Journal of Optical Society of America*, 1954, 44, 6, p. 468-471.
- [103] LEPINE, T. *Fonction de Transfert de Modulation*. Cours de Conception Optique. Institut d'Optique Graduate School, Université Jean Monnet, Saint Etienne, 2014.
- [104] BONNIER, N., LINDNER, A.J. *Measurement and compensation of printer modulation transfer function*. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, 19, 1, p. 011010.
- [105] LINDNER, A.J., BONNIER, N., LEYNADIER, C., SCHMITT, F. Evaluation of characterization methods of Printer MTF. In *Image Quality and System Performance V*, 2008, 6808, p. 680806. International Society for Optics and Photonics.
- [106] LIU, X., CHEN, L., ORTIZ SEGOVIA, M.V., FERWERDA, J., ALLEBACH, J.P. Characterization of relief printing. In *Measuring, Modeling, and reproducing Material Appearance*, 2014, 9018, p. 90180P. International Society for Optics and Photonics.
- [107] JANG, W., ALLEBACH, J.P. *Characterization of Printer MTF*. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2006, 50, 3.
- [108] HASEGAWA, J., HWANG, T.-Y., KIM, H.-C., KIM, D.-W., CHOI, M.-H. 2007. Measurement-based objective Metric for the printer resolution. In *Image Quality and System Performance IV*, 2007, 6494, p. 64940D. International Society for Optics and Photonics.
- [109] BONNIER, N., LINDNER, A., LEYNADIER, C., SCHMITT, F. Compensation of Printer MTFs. In *Color Imaging XIV: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications*, 2001, 7241, p. 724119. International Society for Optics and Photonics.

- [110] BONNIER, N., LINDNER, A., LEYNADIER, C., SCHMITT, F. Compensating Printer Modulation Transfer Function in Spatial and Color Adaptive Rendering Workflows. In *Color and Imaging Conference*, 2008, 1, p. 93-98. Society for Imaging Science and Technology.
- [111] PAGE, M., BOUST, C., OBEIN, G., ORTIZ SEGOVIA, M.V. *Method for improving relief prints*. P3875EP00, brevet, en cours de publication.
- [112] JI, W., POINTER, M.R., LUO, R.M., DAKIN, J. *Gloss as an aspect of the measurement of appearance*. *Journal of Optical Society of America A*, 2006, vol. 23, no 1, p. 22-33.
- [113] NG, Y., MASHTARE, D., KESSLER, J., WANG, J., KUO, C., MAGGARD, E., MEHTA, P. Standardization of Perceptual based Gloss and Gloss Uniformity for Printing Systems. In *Proceedings of Fifth International Symposium on Multispectral Color Science*, Rochester, NY, 2003, p. 88-93.
- [114] KHAN, A. *All about Sparkles*. *Optics & Photonics News*, 2013, p. 42-45.
- [115] FERRERO, A., CAMPOS, J., RABAL, A.M., PONS, A. *A single analytical model for sparkle and graininess patterns in texture of effect coatings*. *Journal of Optical Society of America*, 21(22), 2013.
- [116] ZHANG, F., DE RIDDER, H., PONT, S. The influence of lighting on visual perception of material qualities. In *Proceedings SPIE 9394, Human Vision and Electronic Imaging XX*, SPIE, San Francisco, 2015.
- [117] FERRERO, A., BAYÓN, S. *The measurement of sparkle*. *Metrologia*, 2015, 52:2, p. 317-323.
- [118] HUNT, R.W.G., WRIGHT, W.D. *The reproduction of colour*. Wiley, 2004, 724 p.
- [119] International Color Consortium [juin 201], color.org.
- [120] DEBRAY, P. *Comparative Performance of Color-Difference Equations for Textiles*. Mémoire de fin d'étude, Grenoble INP Pagora, 2017, 47 p.
- [121] WEI, W. Surface micro-roughness, cleaning and perception. In *Proceedings of the ICOM-CC 16th Triennial Meeting*, Lisbonne, Portugal, 2011.
- [122] WEI, W., STANGIER, S., DE TAGLE, A. In situ characterisation of the surface of paintings before and after cleaning using white light confocal profilometry. In *Proceedings of Art 5*, Lecce, Italie, 2005.
- [123] FONTANA, R., GAMBINO, M. C., GRECO, M., MARRAS, L., MATERAZZI, M., PAMPALONI, E., PEZZATI, L. *High-precision surface analysis of the roughness of Michelangelo's David*. *Optical Metrology for Arts and Multimedia*, 2003, 5146, p. 236-244.
- [124] STEIN, M., HAUGEN, A. *Topographic registration of surfaces on canvas paintings : investigation with a mobile non-contact profilometer*. *Restaura*, 2010, 6, p.396-401.

- [125] EIPPER, P.-B., FRANKOWSKI, G. *Examination of cleaned oil paint surfaces by 3D-measurement technology. The Picture Restorer*, 2004, p.5-13.
- [126] GRACZYK, A. *A pleins tubes ! Le tube de peinture utilisé comme mise en œuvre dans les années 1910 pour La Créole au Perroquet par Alexis Mérodack-Jeaneau*. Diplôme de restaurateur du patrimoine, Institut national du patrimoine, 2016, 518 p.
- [127] Recommandations pour la transcription de documents éditées par l'INSHEA. [mars 2018], [http://www.inshea.fr/sites/default/files/SDADVrecommandations\\_transcription.pdf](http://www.inshea.fr/sites/default/files/SDADVrecommandations_transcription.pdf). Document transmis par Madame Katerine Romeo, maitre de Conférence à l'Université de Rouen.
- [128] METATLA, L. *Tapis rouge pour l'impression : Etude et conservation-restauration d'un tapis turc du XIX<sup>ème</sup> siècle conservé au musée du Quai Branly*. Diplôme de restaurateur du patrimoine, Institut national du patrimoine, 2016, 201 p.
- [129] PHILIPPE, E. *Innover, connaître et transmettre. L'art de la restauration selon François-Toussaint Hacquin (1756-1832)*, *Techné*, 2008, n° 27-28, p. 53-59.
- [130] Séminaire de recherche sur la conservation-restauration du patrimoine. Essai rédigé par Poirier, M. [juillet 2018], <https://tablesdetravail.hypotheses.org/721>.
- [131] VIOLLET-LE-DUC, E. *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI<sup>e</sup> au XVI<sup>e</sup> siècle*, Paris, Morel, 1866, tome 8, article « Restauration ».
- [132] RUSKIN, J. *The lamp of memory*. London, Penguin Group, 2008, 115 p.
- [133] BRANDI, C, DEROCHE, C. *Théorie de la restauration*. Ecole nationale du patrimoine, 2001.
- [134] ALTHÖFER, H. Historical and ethical principles of restoration. In *Proceedings of the 6th Triennial Meeting, ICOM Committee for Conservation*, Ottawa, 1981, vol. 2.
- [135] BERTHOLON, R. *De la pratique à la théorie : une déontologie née dans les ateliers*. Bibliothèque Nationale de France, Conservation-restauration des documents graphiques, de la théorie à la pratique, Journée d'étude, 2013.
- [136] BLAYO, A. *Formulation des encres pour l'impression*. Ed. Techniques de l'Ingénieur, 2007.
- [137] Produits chimiques industriels. [août 2018], [polysistec.com](http://polysistec.com).
- [138] Données constructeurs Breuckmann™.
- [139] Imagerie scientifique pour le patrimoine. [juillet 2018], <https://copa.hypotheses.org>.
- [140] Histoire du costume. [juin 2018], [les8petites8mains.blogspot.com](http://les8petites8mains.blogspot.com).
- [141] LAVER, J. *Histoire de la mode et du costume*. Thames & Hudson, 2003, 302 p.

- [142] CAUBET, A., HARPER, P.O., ARUZ, J., TALLON, F. *La Cité royale de Suse, découvertes archéologiques en Iran conservées au musée du Louvre*. Réunion des musées nationaux, 1994.
- [143] PERROT, J. *Le palais de Darius à Suse*. Editions Faton, 2008.
- [144] LOPEZ, A.M. *Metalworking through History: An Encyclopedia*. ABC-CLIO, 2009.
- [145] Feuilles du musée du Louvre, département des Antiquités orientales. [mars 2018], <http://mini-site.louvre.fr/feuilles/DAO/Iran/index.html#p=16>.
- [146] VANDENBERGHE, Y. *Etude de restes de couches de surface (Rapport n°36696)*. C2RMF, décembre 2017.
- [147] RICHARDIN, P. *Faisabilité de la datation par le carbone 14 (Rapport n°36154)*. C2RMF, octobre 2017.
- [148] BOUST, C., EZRATI, J.-J. La mesure de la couleur appliquée à la restauration, à la présentation et à la diffusion des œuvres d'art. *Technè*, 2007, 26.
- [149] PAGE, M., CASTELLE, M., BLANC-RIEHL, C., ROBCIS, D., BOUST, C. De l'imagerie à l'impression en relief : acquisition et reproduction des données d'apparence. *Journée d'étude « A la surface du métal », Archives nationales, Paris, 25 mai 2018*.
- [150] PASTOUREAU, M. Le sceau médiéval. *Pour la science*. 1996, p. 24-25.
- [151] NIELEN, M.-A., BLANC-RIEHL, C. *Les sceaux*. Archives nationales, 2017.
- [152] CASTELLE, M., DILLMANN, P., VEGA, E. Savoir-faire et alliages dans les ateliers de fabrication des matrices de sceaux au Moyen-Âge. *Journée d'étude « A la surface du métal », Archives nationales, Paris, 25 mai 2018*.
- [153] PLINE L'ANCIEN. *Histoire naturelle XXXV : La Peinture*. Les Belles Lettres, 2001, 183 p.
- [154] PLATON. *Le Sophiste*. Garnier Flammarion, 2006, 324 p.
- [155] ARISTOTE. *La poétique*. Les Belles Lettres, 2002, 148 p.
- [156] BOCCACE, *Le Décaméron*. Le Livre de Poche, 1994, 896 p.
- [157] Collectif. *Florence*. Encyclopédie du voyage, Gallimard, 1993, 396 p.
- [158] ALBERTI, L.B. *De Pictura*, cité par AMEISEN, J.C. *Sur les épaules de Darwin, retrouver l'aube*. Les Liens qui libèrent, 2014, 448 p.
- [159] Collectif. *Histoire de l'Art, 1000 – 2000*. Hazan, 1999, 542 p.
- [160] Musée du Prado. [site consulté en octobre 2018], [museodelprado.es](http://museodelprado.es).

[161] FELIBIEN, A. *Conférences de l'Académie Royale de Peinture et de Sculpture pendant l'année 1667*, réimpression Londres, Collegium Graphicum, 1972.

[162] DIDEROT, D. *Œuvres IV*. Ed. Laurent Versini, 1994-1997.

[163] TUNSTALL, K.E. Diderot, Chardin et la matière sensible. *Dix-huitième siècle*, 2007, 1, 39, p. 577-593. [octobre 2018]. [www.cairn.info/revue-dix-huitieme-siecle-2007-1-page-577.htm](http://www.cairn.info/revue-dix-huitieme-siecle-2007-1-page-577.htm).

[164] DU BOS, J.B. *Réflexions critiques sur la poésie et sur la peinture*. Ecole nationale supérieure des Beaux-Arts, 1993.

[165] LANTHONY, P. *Histoire naturelle de la vision colorée*. Editions de la Martinière, 2012, 191 p.



## Annexes



# Annexe A.1 1 Apparence et histoire de l'art

## 1. Représenter le réel : une préoccupation occidentale

Il semblerait que peu de civilisations, à l'exception du monde occidental, se soient préoccupées à un tel point de reproduire fidèlement l'apparence des objets. Depuis la Préhistoire et ses animaux réalistes, une histoire de l'apparence se dessine ; histoire occidentale qui n'existe pas sur les autres continents.

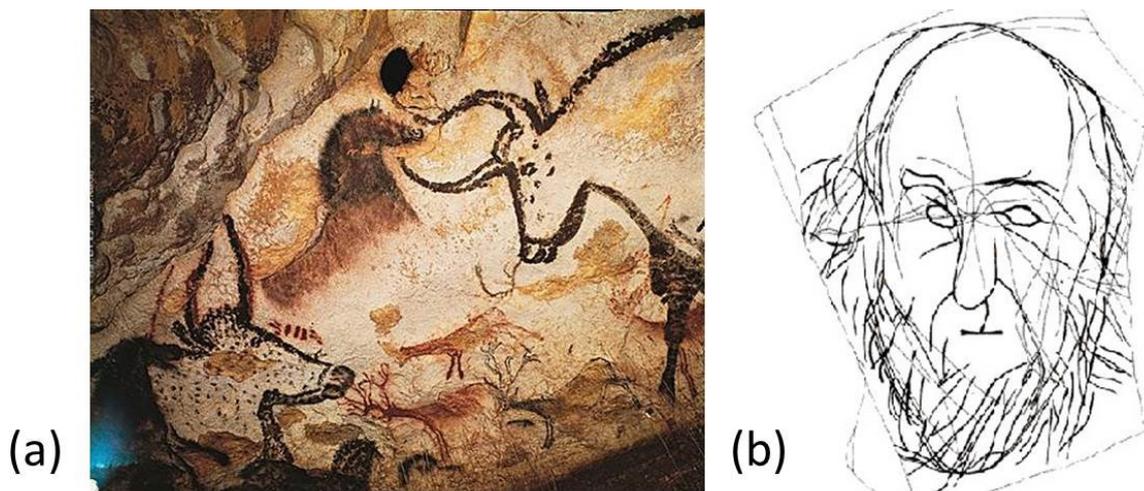


Figure A.1.1 1 – Exemples tirés de l'Art pariétal. (a) Grotte de Lascaux. Image : larousse.fr.  
(b) Portrait gravé retrouvé sur le site de La Marche, Lussac-les-Châteaux. Image : hominides.com.

La représentation picturale du réel débute dès les temps préhistoriques. Au Paléolithique, les hommes ornent les parois de grottes de motifs animaliers et parfois, humains. Les animaux sont saisissants de réalisme (voir Figure A.1.1 1) ; le mouvement semble même suggéré. Plus tardivement, au Néolithique, des représentations de visages humains apparaissent, semblables à nos caricatures modernes (Figure A.1.1 1).

C'est pendant l'Antiquité grecque que se développe une vraie recherche de la reproduction de l'apparence. Si au tout début de l'Art grec, les corps et les visages sont excessivement stylisés, reproduire le réel devient peu à peu la préoccupation des artistes et une tendance critiquée par les philosophes.

### 1.1 Naissance et critiques d'un art illusionniste

La peinture antique, dont il ne reste que peu de traces, reste évoquée dans les textes anciens comme l'art illusionniste par excellence : les peintres antiques grecs étaient appréciés pour leur talent à reproduire le réel. Pline l'Ancien rapporte ainsi une anecdote sur les peintres grecs Parrhasius et Zeuxis, qui cherchaient à se départager. Zeuxis peignit une coupe de raisins si réalistes que des oiseaux s'en approchèrent et tentèrent de les grappiller. Parrhasius

quant à lui peignit un rideau, si bien fait que Zeuxis crut qu'il était réel, et tenta de le soulever pour voir la peinture qu'il cachait. Ainsi Zeuxis trompa-t-il les oiseaux, et Parrhasius un artiste [153].

Cet art illusionniste se poursuit sous la période romaine. La statuaire tout comme la peinture en fait état. La statuaire antique se caractérise en effet par la recherche de la perfection anatomique, de la ressemblance du modelé et de l'expression du mouvement. La peinture recherche l'imitation de la nature, la statuaire son imitation et son perfectionnement. La mosaïque romaine est dans la même veine et tente la reproduction de l'apparence. Les célèbres portraits du Fayoum sont également très réalistes. Plusieurs caractéristiques sont communes à la peinture et la mosaïque dans la reproduction de l'apparence : le modelé très délicat des ombres et de la lumière, les aplats de couleur blanche pour figurer les reflets brillants, les dégradés de couleurs délicats, la présence d'un reflet pupillaire dans les yeux des personnages. Ces modulations étaient absentes de la peinture sur céramique prisee par les Grecs. Elles figurent une réelle volonté de représenter l'apparence des objets.

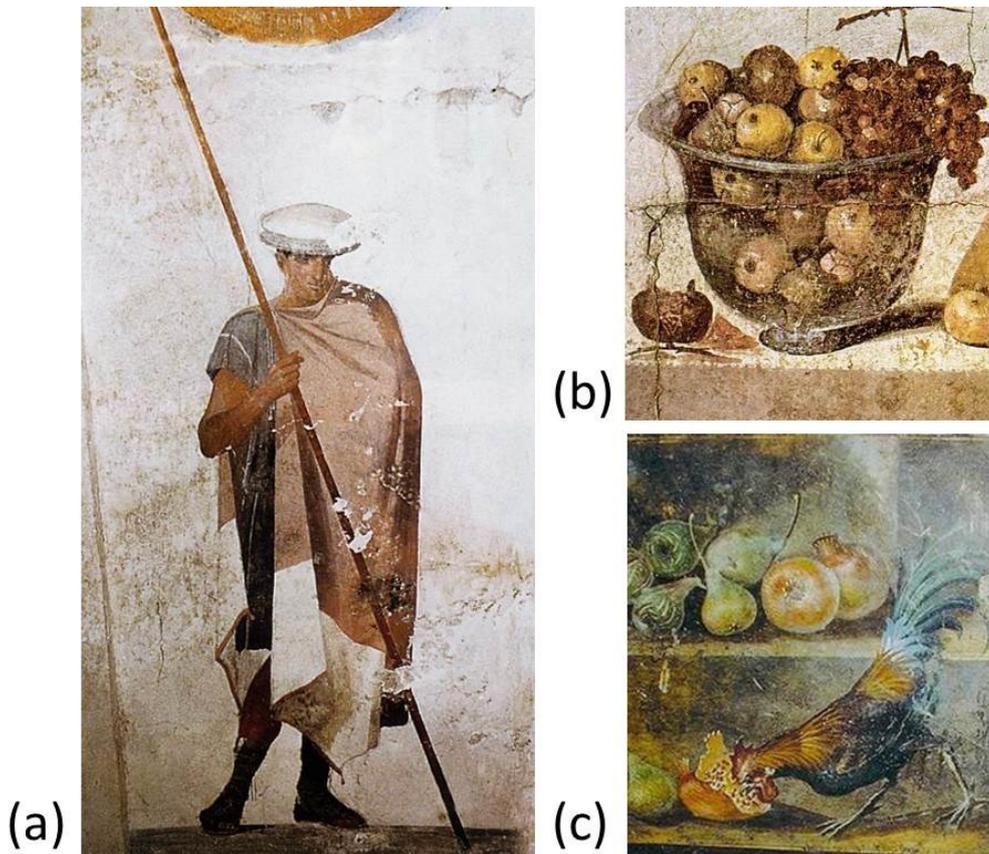


Figure A.1.1 2 – Exemples tirés de la peinture grecque et romaine. (a) Rare exemple de peinture grecque : Soldat macédonien, tombe d'Agios Athanassios, Thessalonique, IV<sup>ème</sup> siècle av. J.-C, peinture sur fresque. Peinture romaine : (b) Corbeille de fruits, villa de Julius Félix, peinture sur fresque, Pompéi. (c) Coq et grenades, maison des Peintres, peinture sur fresque, Pompéi. Images : wikipedia.fr.

Cet art illusionniste est fortement décrié par certains courants philosophiques. Ainsi Platon critique-t-il vivement l'art de la peinture. Il emploie pour cela plusieurs termes : « phântasma » ou « tékhnē phantastiké », l'illusion, « eidōlon », l'image, « eikón », la copie, ou « mimésis », l'imitation. L'image est soit une copie, soit une illusion. Elle est fautive par nature : la représentation suppose l'existence d'un modèle, elle n'existe donc pas en tant que telle, elle n'est pas autonome. En conséquence, son existence n'a pas de valeur, elle est dépendante. Platon écrit dans Le Sophiste :

« Lorsqu'il y a fausseté, il y a tromperie. [...] Et dès qu'il y a tromperie, tout est plein, nécessairement, d'images, de copies, d'illusions. » [154]

La « mimésis » est donc fortement critiquée par Platon. L'imitation des choses telle qu'elle existe dans l'art pictural ou la poésie est pour lui le dernier degré, après la vérité (la nature) créée par un dieu et les choses créées par les artisans. Aristote se détache de ces considérations et donne à la « mimésis » un sens plus positif, propre à l'homme ; mais les exemples qu'il donne portent plutôt sur le genre théâtral que sur la peinture [155].

## **1.2 Maîtriser la géométrie pour mieux simuler le réel**

Au Moyen-Age, la question de la représentation fidèle de l'apparence semble passer au second plan, tandis que couleurs et symboles gagnent en importance. L'accent n'est plus mis sur la gestion des formes, la transparence ou les reflets. Le but de l'art n'est d'ailleurs plus l'agrément de l'homme ou le témoignage de la virtuosité de l'artiste, mais la glorification des idées religieuses. Il faut attendre le XIII<sup>ème</sup> siècle pour que la tendance naturaliste émerge et avec elle, le souci de la reproduction de l'apparence visuelle. C'est le peintre florentin Giotto di Bondone (v. 1266-1337) qui le premier remet l'homme et la nature au centre de l'art pictural. Boccace raconte ainsi :

« Le second de nos personnages, Giotto, était doté d'un tel génie que, quoi que créât la nature, génératrice et animatrice de toutes choses par la révolution continue des cieux, il sut le reproduire au crayon, à la plume ou au pinceau avec une fidélité, ou plutôt un mimétisme tel que, dans nombre de ses œuvres, le regard des hommes finit par être abusé, confondant peinture et réalité. » [156]

La perspective fait une timide apparition dans l'œuvre de Giotto, caractérisée par sa sobriété, sa monumentalité et son réalisme [157]. Giotto ouvre la voie à toute une série d'artistes remarquables, qui vont s'attacher à décrire mathématiquement les lois de la nature et à les reproduire. Parmi eux, Brunelleschi (1377-1446) s'inspire des architectes et artistes de l'Antiquité et livre une œuvre foisonnante. Il est considéré comme l'inventeur de la perspective. Ses lois seront fidèlement appliquées par Masaccio (1401-1428) qui livre un impressionnant trompe-l'œil, appelé le « mur troué » par Vasari (voir Figure A.1.1 3).



Figure A.1.1 3 – Naturalisme. (a) Giotto di Bondone, église de Santa Croce, chapelle Bardi, mort de Saint-François. Florence. Image : wikipedia.fr. (b) Masaccio, église Santa Maria Novella, le « mur troué », Florence. Image : M. Page, C2RMF, 2018.

Masaccio est le premier peintre (moderne) qui utilise l’optique et la géométrie pour créer des représentations fidèles à la réalité. La perspective découpe des volumes, les ombres et la lumière créent un relief, des aplats de peinture blanche ou claire simulent un léger brillant. Toute la Renaissance italienne suivra cette direction naturaliste : la quête de l’apparence est relancée, et cette fois-ci, elle est unanimement valorisée.

Leon Battista Alberti (1404-1472), élève de Brunelleschi, théorise la perspective dans son traité De Pictura :

« Il faut que l’artiste imite et reflète la nature, et pour exprimer la réalité et la beauté du monde, de la nature et des êtres humains, il doit utiliser les lois des mathématiques et de l’optique. » [158]

Parallèlement aux œuvres des Florentins qui se surpassent peu à peu dans la représentation de l’apparence des objets et de la nature, les peintres flamands arrivent aussi à une virtuosité exceptionnelle dans l’art de l’imitation. Les frères Van Eyck deviennent ainsi des maîtres du réalisme. La Figure A.1.1 4 donne deux exemples de leur talent : les tissus chamarrés et la patine brillante du lustre sont extrêmement bien rendus. La technique du glacis, légère superposition de couches de peinture à l’huile, permet d’obtenir un tel résultat.



Figure A.1.1 4 – Jan et Hubert Van Eyck. (a) *Le retable de l'Agneau mystique*, détail. (b) *Les époux Arnolfini*, détail.

### 1.3 Apogée de l'apparence

A partir de la Renaissance, lois optiques et techniques picturales s'allient pour permettre la représentation des aspects visuels naturels par la peinture. Les peintres n'hésiteront pas à glisser des détails communs dans leurs œuvres, pour montrer leur maîtrise à représenter au mieux un objet familier. Le genre des natures mortes réapparaît ; l'art du portrait explose. Les artistes se frottent à tous les jeux de brillant, les uns après les autres, avec plus ou moins de succès : carnations des peaux, reflets pupillaires (présents dès l'Antiquité, mais qui avaient disparus de la période médiévale), transparence de l'eau, chatoiement des bijoux et des textiles, miroirs, astres. Les constructions géométriques rigoureuses et le recours à une palette large de couleurs rendent toutes les reproductions possibles. L'utilisation de l'huile facilite également l'apposition de la couleur, les mélanges et les jeux de lumière.

## 2. Peindre le brillant

### 2.1 Reflets sur des surfaces convexes

L'ouvrage *Lumière, Vision et Peinture* du Professeur Philippe Lanthony aborde avec pertinence les questions géométriques liées à la représentation des objets [20]. A travers de nombreux exemples, le texte évoque la reproduction de l'apparence sur une surface bidimensionnelle : la toile de peinture. L'auteur aborde la question de la représentation des reflets dans son passionnant premier chapitre. Lanthony précise que le but du peintre est de montrer le « résultat visuel » afin d'indiquer la « cause structurale » de l'objet : le peintre simule au moyen de ses outils propres la réflexion visuelle créée par la combinaison d'un objet donné avec une certaine source lumineuse.

La Figure A.1.1 5 donne plusieurs exemples tirés de la démonstration de Lanthony. Le premier tableau, *Vanité à la boule de cristal*, présente une sphère convexe, qui agit tel un miroir et permet au peintre de se mettre en abîme : en se représentant ainsi lui-même, l'artiste signe son œuvre.

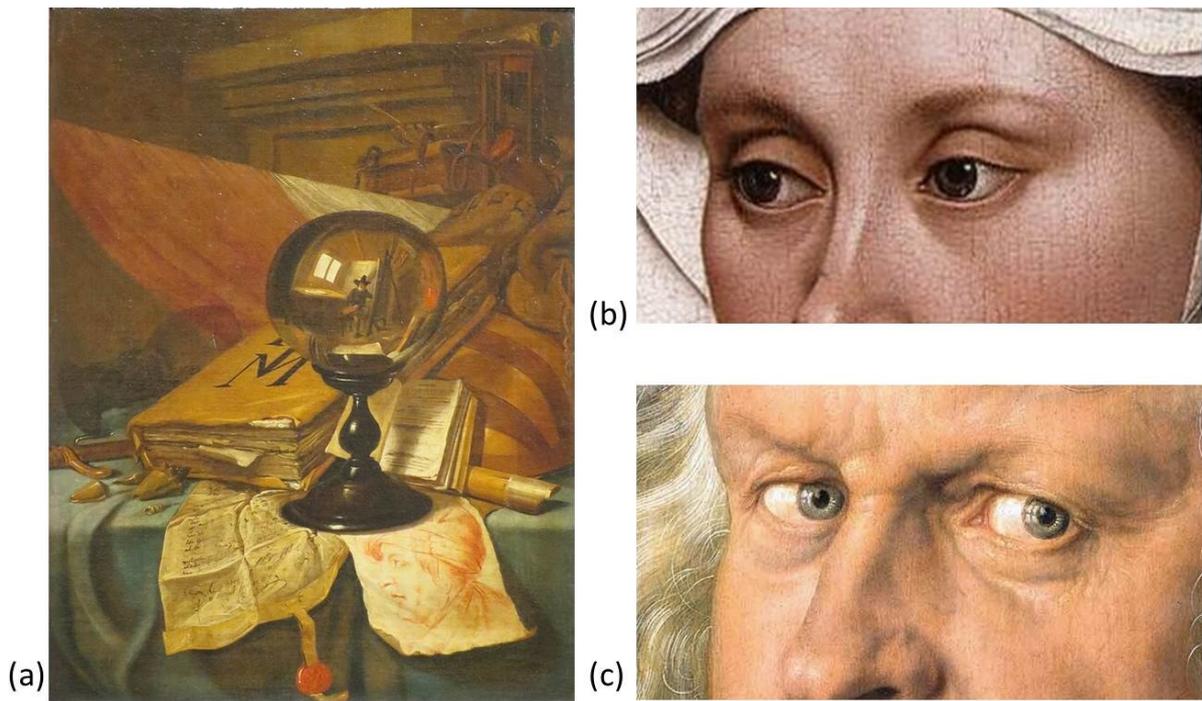


Figure A.1.1 5 – Exemples tirés de [20]. (a) Vincent Van der Vinne, *Vanité à la boule de cristal*, v. 1670, huile sur toile, musée Pouchkine, Moscou. Image : wikipedia.fr. (b) Robert Campin, *Portrait de femme*, détail, v. 1435, huile sur bois, National Gallery, Londres. Image : The National Gallery, 2018. (c) Albrecht Dürer, *Portrait de Hieronymus Holzschuher*, 1526, huile sur bois, Gemäldegalerie, Berlin. Image : J.P. Anders, Gemäldegalerie.

Les exemples (b) et (c) de la Figure A.1.1 5 sont des reflets pupillaires. Présents dans la peinture antique (voir les portraits du Fayoum du chapitre A.1), les reflets pupillaires disparaissent de la peinture médiévale, puis réapparaissent au XV<sup>ème</sup> siècle, dans les Flandres. Le reflet pupillaire consiste parfois simplement en une petite tache de peinture blanche sur la cornée, qui insuffle mouvement dans le regard et vie au portrait (comme en (b)), parfois en une structure plus complexe, comme c'est le cas en (c), où l'artiste a représenté le reflet de la source lumineuse dans l'œil de son modèle – en l'occurrence ici, une fenêtre. L'auteur note que la présence d'un reflet cornéen n'est pas systématique : Léonard de Vinci n'en place jamais sur les yeux de ses personnages, la lumière de ses tableaux étant floue et diffuse [20].

## 2.2 Reflets sur l'eau plane ou en mouvement

Lorsqu'un plan d'eau est calme, il offre au peintre une surface de type miroir plan, sur laquelle le paysage va se refléter. Mais une fois en mouvement, de multiples facettes se forment, chacune donnant une réflexion dans une orientation. Selon le style de l'artiste, la question du reflet sur l'eau sera traitée très différemment. L'analyse de la luminosité du reflet et de son niveau de détail renseigne aussi sur la position physique du peintre lors de l'exécution de l'œuvre (ceci étant vrai pour les peintres de plein air, à partir du XIX<sup>ème</sup> siècle).



Figure A.1.1 6 – Peder S. Krøyer, *Soir d'été sur la plage de Skagen. Le Peintre et sa femme*, 1899, huile sur toile, Den Hirschsprungske Samling, Copenhague.

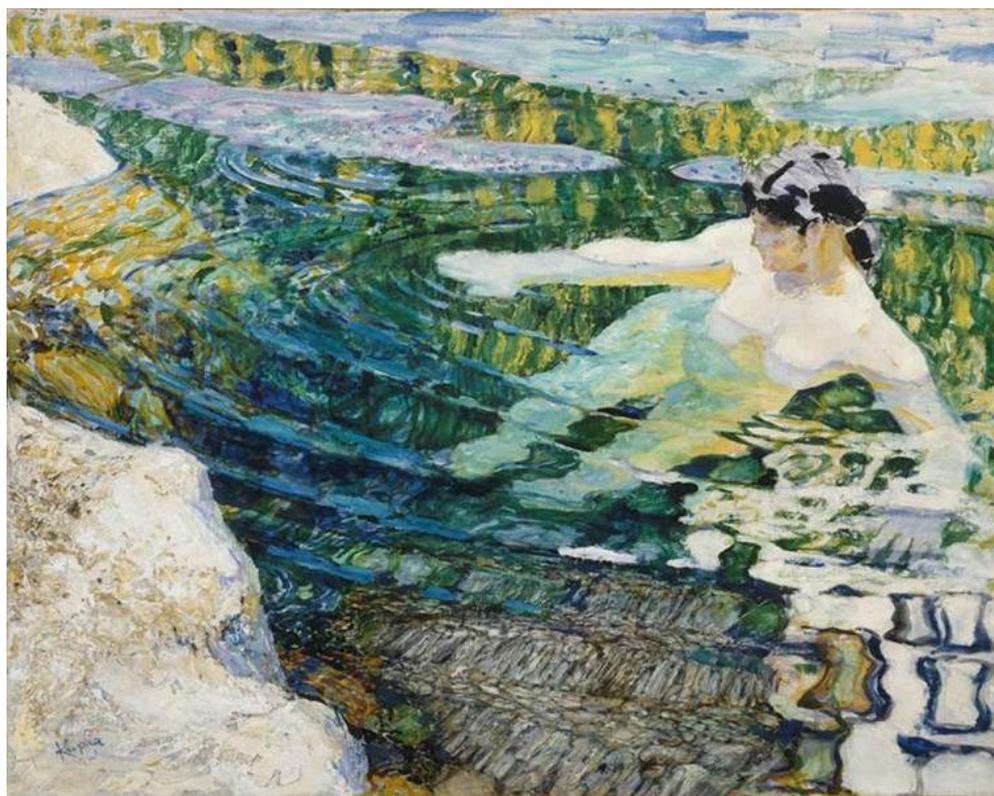


Figure A.1.1 7 – František Kupka, *L'eau*, 1906-1907, huile sur toile, AM4161P, musée des Beaux-Arts, Nancy. Image : Centre Pompidou, MNAM-CCI.

Les Figure A.1.1 6 et Figure A.1.1 7 donnent deux exemples de reflets sur l'eau en mouvement. Sur la toile de Krøyer (Figure A.1.1 6) la lune se reflète sur l'eau ; le reflet prend la forme des petites aires qui forment la surface de la mer. Sur le tableau de Kupka (Figure

A.1.1 7), dans un style très différent, l'eau reflète le paysage verdoyant qui entoure la baigneuse. Transparence et reflets se mêlent pour former un tableau envoûtant.

### 2.3 Matières brillantes

Après les surfaces convexes qui sont un problème de géométrie à part entière, et l'eau dont la transparence et les reflets ont été sujets à toutes les expérimentations picturales, nous arrivons aux objets et matières du quotidien. Comment rendre le brillant de la peau, le chatoiement d'une étoffe, le scintillement d'un bijou ?

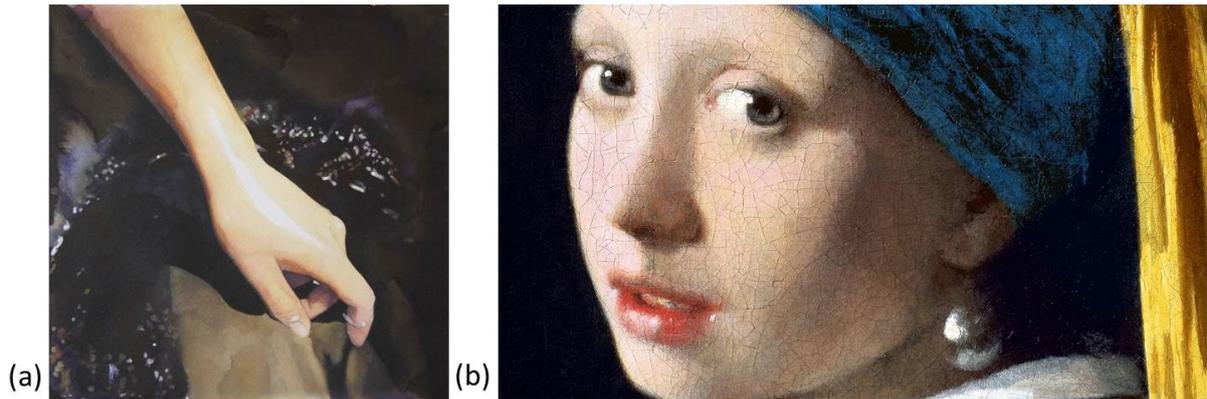


Figure A.1.1 8 – Brillant des corps, brillant des perles. (a) Katia Bourdarel, *Le miroir du ciel*, encre et aquarelle sur papier. (b) Johannes Vermeer, *La Jeune fille à la perle*, détail, v. 1665, huile sur toile, 670, Mauritshuis, La Haye. Image : Mauritshuis.

La Figure A.1.1 8 donne deux exemples. En (a), le brillant de la peau est figuré par un aplat de couleur blanche. En (b) le brillant des lèvres est suggéré par la présence d'une couleur plus pâle, tandis que de l'huile blanche rehausse les yeux, les dents et la perle.

L'huile n'est pas le seul médium qui permet une représentation précise de l'apparence brillante : le pastel, malgré sa structure rugueuse et mate, le permet aussi. La Figure A.1.1 9 illustre ce point. Lorsqu'on considère ce portrait, la qualité du rendu des tissus et des bois est stupéfiante. Il faut s'approcher très près pour distinguer la structure granuleuse du pastel.



Figure A.1.1 9 – Maurice Quentin de la Tour, *portrait en pied de la marquise de Pompadour*, 1752-1755, pastel sur papier gris-bleuté, INV 27614, département des Arts Graphiques, musée du Louvre. Image : L. Chastel, musée du Louvre.

## 2.4 Choix techniques

Comment peindre le brillant ? Selon les époques et les mouvements, différents choix ont été faits par les artistes. Des aplats de peinture blanche sont la possibilité la plus évidente : en plaçant des taches de blanc sur la pupille ou la matière, on simule une réflexion lumineuse. L'ajout d'un glacis, superposition de plusieurs couches colorées transparentes, donne à la peinture une teinte profonde et intense. Placé de manière locale sur un objet, le glacis permet d'augmenter la sensation brillante et réaliste. La technique est très utilisée par les primitifs flamands et les peintres de la Renaissance, qui jouent sur l'illusionnisme de leurs toiles.

Certaines toiles présentent une superposition de peinture sur les zones brillantes : c'est le cas des *Femmes d'Alger* présentées Figure A.1.1 10 : sur le bracelet, on distingue lorsqu'on est face au tableau un petit amas de peinture ; cette protubérance blanche crée des reflets différents lorsqu'on tourne autour de la toile.



Figure A.1.1 10 – (a) Eugène Delacroix, *Femmes d'Alger dans leur appartement*, 183, huile sur toile, INV 3824. Image : A. Dequier et M. Bard, musée du Louvre. (b) Détail. Image : M. Page, C2RMF, 2018.

Au cours des siècles, les choix esthétiques et techniques pour représenter le brillant ont changé. Si certains artistes s'affranchissent complètement du rendu de l'apparence (qui n'existe pas chez les Cubistes par exemple), d'autres traitent les reflets d'une manière différente, en larges aplats, comme Roy Lichtenstein, artiste majeur du *Pop Art*.



Figure A.1.1 11 – Henri Matisse. (a) *Les poissons rouges*, 1912, huile sur toile, J 3299, musée Pouchkine, Moscou. Image : collectionchtchoukine.com. (b) *Nature morte sur camaïeu de bleu*, 1909, huile sur toile, ΓΘ 6569, musée de l'Hermitage, Saint-Petersbourg. Image : hermitagemuseum.

La Figure A.1.1 11 présente deux toiles d'Henri Matisse, artiste fauve. Sur l'image (a), les reflets brillants sont absents : l'eau elle-même n'est figurée que par sa transparence. Sur l'image (b) en revanche, on distingue de petits aplats clairs sur la cafetière et le vase, mais l'orientation du reflet sur le vase vert ne semble pas correspondre du tout avec l'idée que l'on se fait de la position de la source. L'artiste interprète à sa façon ce qu'il voit, sans se soucier de l'optique.

Sur la Figure A.1.1 12, deux œuvres de Roy Lichtenstein sont données. La première est une réinterprétation de la *Nature morte aux poissons rouges* de Matisse, version sérigraphie et Pop Art : l'eau a retrouvé ses reflets, peints en larges aplats blancs. En (b), un miroir peint donne un unique reflet brillant figuré par des bandes blanches qui ondulent.

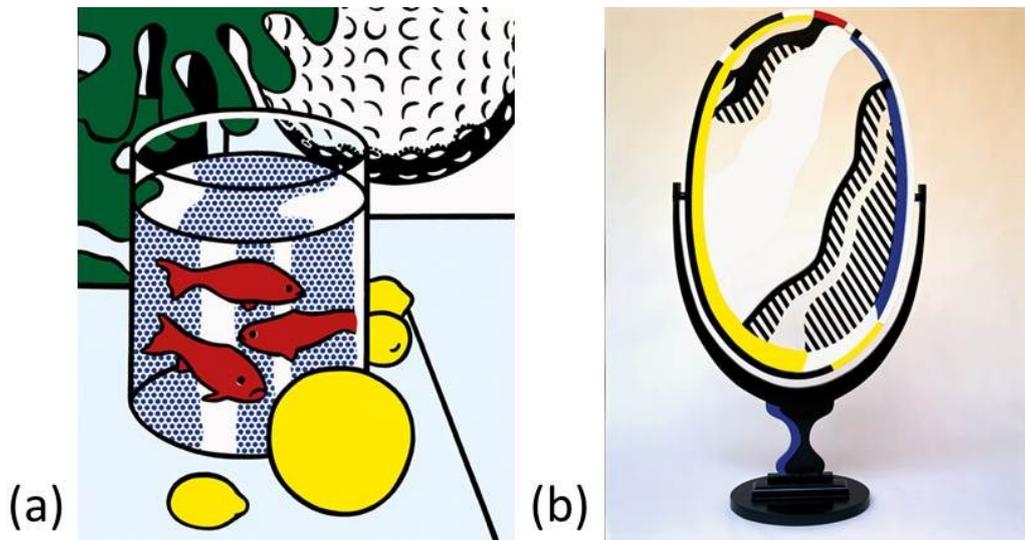


Figure A.1.1 12 – Roy Lichtenstein. (a) *Nature morte aux poissons rouges*, 1972, Huile et Magna sur toile, Collection particulière. (b) *Miroir II*, 1977, bronze peint et patiné, collection particulière. Images : mediation.centrepompidou.fr.

La bande dessinée ou les comics reprendront des procédés similaires pour figurer à l'aide de quelques traits ou aplats blancs le brillant d'un vêtement, d'un objet ou d'une chevelure. L'illusionnisme n'est plus le propos : le but est simplement de permettre l'identification des objets ou la reconnaissance des personnages.

### 3. Quelques exemples

#### 3.1 Natures mortes

La nature morte désigne un genre artistique dans lequel sont représentés des objets ou animaux inanimés. La nature morte peut être symbolique, mais elle est souvent une simple représentation de la réalité des choses, qui s'inscrit dans le goût (très flamand au XVII<sup>ème</sup> siècle) pour la « culture domestique » [159]. La nature morte est pour l'artiste l'occasion de montrer sa virtuosité dans la représentation réaliste du monde. Du tout début de la Renaissance jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle, elle est illusionniste.

Sur la Figure A.1.1 13, le peintre a représenté derrière une Annonciation (sujet du *Tryptique de Mérode*) tout un intérieur domestique : on distingue les reflets brillants sur le vase et le bougeoir, où la source (une fenêtre à battants) se distingue. Les objets contrastent avec la table en bois et le mur mat.



Figure A.1.1 13 – Robert Campin, dit Maître de Flémalle, détail du panneau central du *Tryptique de Mérode*, 1427-1432, huile sur bois, The Metropolitan Museum of Art, New York. Image : [metmuseum.org/art/collection](https://www.metmuseum.org/art/collection).



Figure A.1.1 14 – Francisco de Zurbarán, *Nature morte avec tasses et poteries*, vers 1650, huile sur toile, P002803, musée national du Prado, Madrid. Image : museodelprado.es.

La Figure A.1.1 14, œuvre plus tardive, donne à nouveau à voir la virtuosité de l'artiste pour représenter différentes matières : le bois de la table, mat, la vaisselle en étain, satinée, deux céramiques vernissées brillantes, une terre cuite mate, une tasse en argenterie dorée [160]. La lumière modèle les objets : elle est tantôt diffusée par les surfaces, tantôt réémise dans une direction, donnant ainsi les reflets spéculaires et la sensation brillante. Le peintre donne ainsi une saisissante vision de différents aspects de surface.

Le peintre de natures mortes, malgré son talent, est moins bien considéré que le peintre « du vivant ». André Félibien écrit ainsi au XVIII<sup>ème</sup> siècle :

« Celui qui fait parfaitement des paysages est au-dessus d'un autre qui ne fait que des fruits, des fleurs ou des coquilles. Celui qui peint des animaux vivans est plus estimable que ceux qui ne représentent que des choses mortes et sans mouvemens ; Et comme la figure de l'homme est le plus parfait ouvrage de Dieu sur la terre, il est certain aussi que celui qui se rend l'imitateur de Dieu en peignant des figures humaines, est beaucoup plus excellent que tous les autres » [161]

Pourtant, la peinture de natures mortes trouve d'excellents artistes, et de grands admirateurs. Diderot admire ainsi les toiles de Chardin, qui lui paraissent refléter la nature fidèlement, mais, plaçant le genre de la nature morte tout en bas de l'échelle de la peinture, il n'ose admirer directement le talent du peintre [162, 163].



Figure A.1.1 15 – Jean-Siméon Chardin, Le gobelet d'argent, vers 1760, huile sur toile, MI 1042, musée du Louvre. Image : Réunion des Musées nationaux, base Joconde.

Il n'en reste pas moins que les natures mortes sont appréciées. Peut-être pas pour elles-mêmes, pour les objets qu'elles représentent, mais plutôt pour l'adresse du peintre qui les a peintes avec un exact mimétisme. Jean-Baptiste du Bos écrit :

« Lorsque nous regardons avec application les tableaux de ce genre, notre attention ne tombe pas sur l'objet imité mais sur l'art de l'imitateur. C'est moins l'objet qui fixe nos regards que l'adresse de l'artisan » [164]

La nature morte est un choix de représentation du monde commun, et d'illusionniste, elle est devenue complètement stylisée ou au contraire hyperréaliste. Les impressionnistes ne se soucient plus du rendu réaliste, ce qui n'empêche pas l'observateur de reconnaître les différents éléments des toiles (exemple avec Cézanne Figure A.1.1 16).



Figure A.1.1 16 – Paul Cézanne, *Pommes et oranges*, vers 1899, huile sur toile, musée d'Orsay, Paris. Image : [musee-orsay.fr/fr/collections](http://musee-orsay.fr/fr/collections).



Figure A.1.1 17 – Pablo Picasso, *Verre et coupe de fruits*, 1924, huile sur toile, C 80.12, musée de Soleure, Suisse. Image : SIK-ISEA, Zürich.

Les cubistes déconstruisent complètement les représentations habituelles mais continuent à présenter des natures mortes, décalées, étranges, dont les éléments sont parfois reconnaissables (Figure A.1.1 17), parfois pas. Raoul Dufy écrivait :

« Peindre, c'est faire apparaître une image qui n'est pas celle de l'apparence naturelle des choses, mais qui a la force de la réalité ».

Pour les artistes du Pop Art, la nature morte représente la société de consommation (Figure A.1.1 18). On notera que si la toile de la Figure A.1.1 16 présentait des objets presque dépourvus de reflets brillants mais reconnaissable à leurs variations de couleurs, celle de la Figure A.1.1 18 montre des fruits sans variations de couleur (chacun d'entre eux est monochromatique) mais avec des reflets brillants.

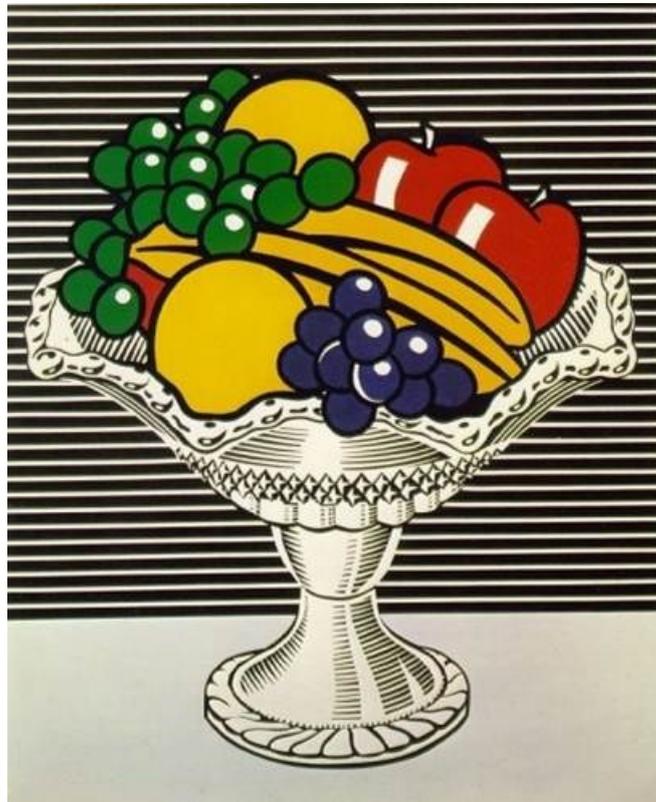


Figure A.1.1 18 – Roy Lichtenstein, *Nature morte à la coupe de cristal* 1973, huile et magna sur toile, 77.64, Whitney Museum of American Art, New York. Image : Estate of Roy Lichtenstein.

### 3.2 Trompe-l'œil

La peinture en trompe-l'œil va encore plus loin : son objectif est de piéger le spectateur en figurant des objets avec un mimétisme parfait. Georges Perec écrit :

« Le but recherché par l'artiste n'est pas de faire dire à celui qui regarde son œuvre "Comme c'est beau !" mais "Comment ? ce n'est pas vrai ?" après avoir touché du doigt pour bien vérifier qu'il s'agissait de peinture et pas d'espace, de perspectives et pas de profondeur, d'ombres feintes et non portées. » [165]

Le trompe-l'œil est plus restrictif que la nature morte : le spectateur doit être piégé et se croire face à de vrais objets en relief. Pour cela, il faut que le peintre crée une sensation de profondeur. Philippe Lanthony écrit que de nombreux facteurs optiques permettent la création de la profondeur visuelle, rendue sensible par la vision binoculaire : effets de perspective, taille relative des objets, forme et taille des ombres, gradients de texture, recouvrements [165]. Un exemple est donné Figure A.1.1 19 (on notera que l'artiste Henri Cadiou était borgne, ce qui ne l'empêchait pas d'appliquer à la lettre les lois de l'optique et de tromper ses spectateurs !).



Figure A.1.1 19 – Henri Cadiou, *Etagère de cuisine*, 1963, huile sur toile, collection particulière. Image : piterrest.com.

Lanthony précise que les « attributs non chromatiques » de la lumière jouent un rôle primordial dans la peinture en trompe-l'œil. Il désigne par là le brillant, la transparence, la texture de la surface : les attributs de l'apparence. C'est grâce à la présence des reflets que l'on croit percevoir une source réel, c'est par l'absence de reflets que l'on reconnaît une texture mate ; tous ces attributs sont présents sur les Figure A.1.1 19, Figure A.1.1 20 ou Figure A.1.1 21.



Figure A.1.1 20 – Kenne Gregoire, *Pommes*, 2012. Image : kennegregoire.com.

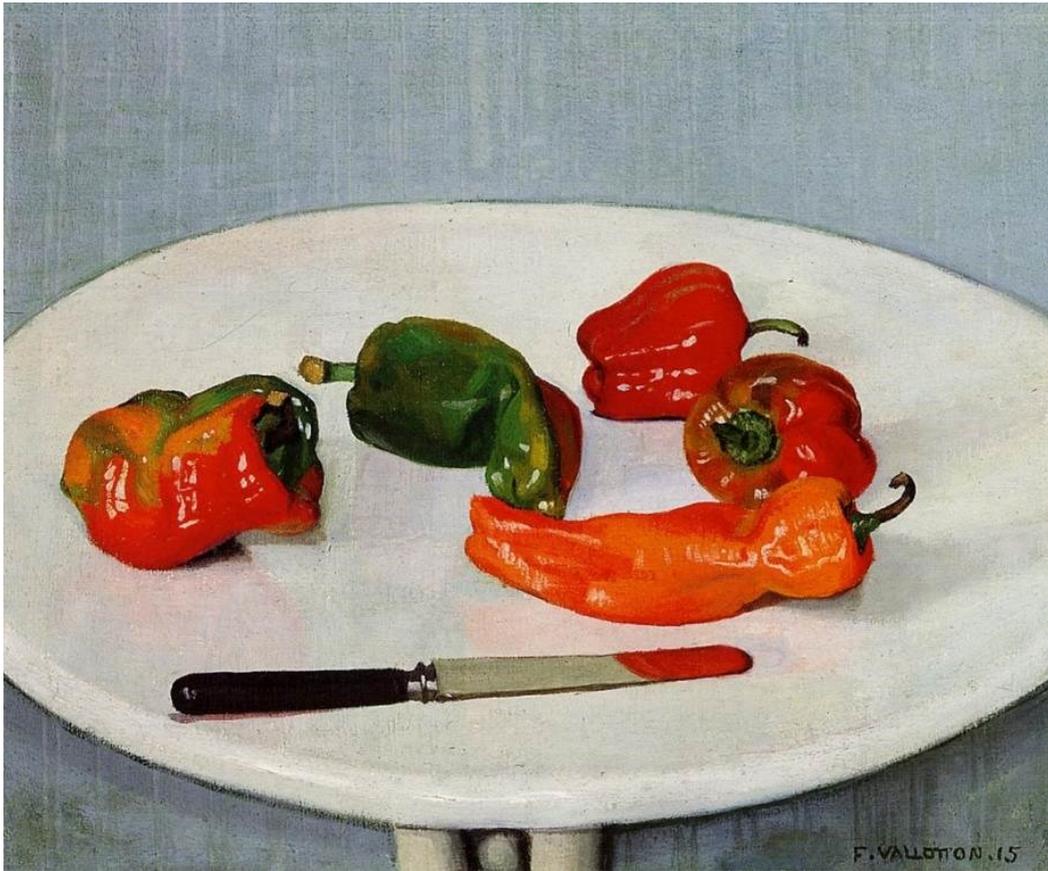


Figure A.1.1 21 – Félix Vallotton, Poivrons rouges, 1915, huile sur toile, C 80.15, musée de Soleure, Suisse. Image : SIK-ISEA, Zürich.

### 3.3 Hyperréalisme

La peinture hyperréaliste est aussi une peinture en trompe-l'œil, basée sur la confusion entre images photographiques et peinture : devant de telles toiles, le spectateur ne sait pas s'il est face à une photographie ou à une peinture. La peinture hyperréaliste est un reflet de la société de consommation de la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle ; les objets reproduits sont des voitures, de la vaisselle, des intérieurs domestiques méticuleux ; les matériaux métalliques et plastiques sont omniprésents. Deux exemples d'un réalisme troublant sont donnés Figure A.1.1 22 et Figure A.1.1 23.



Figure A.1.1 22 – Ralph Goings, *Blue tile with ice water*. Image : artnet.com.



Figure A.1.1 23 – Don Eddy, *Green Volkswagen*, 1971. Image : doneddyart.com.

## 4. Remarque

Les artistes de l'Antiquité grecque ont eu le désir de rivaliser avec la nature et cette motivation illusionniste s'est poursuivie dans toute l'Europe occidentale, de la Renaissance à nos jours. Pourtant, il existe d'autres manières de représenter le monde. La civilisation celte n'a jamais reproduit la figure humaine, mais elle a laissé des œuvres à motifs animaliers ou végétaux, des entrelacs de lignes. L'art persan est essentiellement décoratif, parfois animalier ; les Arts de l'Islam présentent toutes sortes de motifs mais ignore la perspective. L'art pictural des aborigènes d'Australie figure des animaux et des humains stylisés, sur des fonds colorés abstraits. Les civilisations mésopotamiennes et élamites ont créé des représentations d'animaux réalistes ou stylisées. L'Égypte antique a ignoré la perspective mais a produit des images réalistes et détaillées (Figure A.1.1 24). De nombreuses civilisations pratiquent l'**aspectivité**, concept selon lequel est représenté la définition de l'objet et non son apparence visible : ainsi les Égyptiens de l'Antiquité n'étaient pas gênés par la représentation d'un homme avec les épaules de face et les pieds de profil.



Figure A.1.1 24 – Peinture murale, tombe de Nebamon, 1350 av. J.-C., plâtre peint, EA 37977, British Museum, Londres. Image : britishmuseum.org.

La Chine ignore complètement la représentation illusionniste de l'apparence : c'est l'harmonie entre les éléments, les vides et les pleins, les textures noires et blanches qui compte. Le Japon ignore également l'illusion, même si les peintures et estampes japonaises ne sont pas dénuées dans certain réalisme. La notion d'esthétique diffère selon les cultures et les époques, et réalisme n'est pas synonyme d'illusionnisme.



## Annexe A.1 2 Vocabulaire de la sculpture

Le terme « 2.5D » est un abus de langage numérique, utilisé pour placer une technologie spécifique à mi-chemin entre l'impression 2D et l'impression 3D. On comprend facilement que l'impression 2D désigne l'impression traditionnelle, où une unique couche d'encre est déposée sur un support papier, carton, plastique ou autre. Les seuls paramètres sont les dimensions X et Y de la feuille. L'impression 3D ajoute la dimension verticale Z et construit un objet en relief, aux structures potentiellement complexes. Entre les deux, l'impression « 2.5D » crée bien une épaisseur en Z, mais ne permet pas encore autant de complexité dans les formes que l'impression 3D. En bref, l'impression 2.5D est une sous-catégorie de l'impression 3D, limitée dans les reliefs accessibles, mais plus performante quand il s'agit de couleur ou de brillant. Pour parler en utilisant des notions de sculpture, l'impression 2.5D crée un bas-relief sans contre-dépouilles.

Dans cette annexe, nous définissons certains termes de sculpture employés dans notre manuscrit. Les définitions sont adaptées de celles données par Le Petit Robert, édition 1985, et le Vocabulaire de la sculpture éditée par la Maison des Métiers d'Art de Québec ([http://intranet.metierdart.com/documents/lexique\\_sculpture\\_mai\\_2009.pdf](http://intranet.metierdart.com/documents/lexique_sculpture_mai_2009.pdf)) . Quand cela est utile, nous en donnons le sens accepté dans le domaine technologique où nous nous plaçons – celui de l'impression numérique en relief.

- **Sculpture** : Représentation, suggestion d'un objet dans l'espace au moyen d'une matière à laquelle est imposée une forme déterminée dans un but esthétique ; ensemble des techniques qui permettent cette représentation. Les formes produites peuvent être dites en ronde-bosse, en haut-relief, en bas-relief, etc., selon leur volume.

- **Méthode additive** : Sculpture par modelage, supposant une construction de la forme par ajout de matière. En impression 3D, désigne aussi la construction d'une forme par superposition de matière (plastique en fusion, métal, verre...).

- **Ronde-bosse** : Sculpture dont le volume correspond au moins aux  $\frac{3}{4}$  du volume réel d'un corps ou d'un objet et qui peut être entièrement travaillée (face, côtés, revers) ou n'être terminée que sous 3 aspects (face et côtés). La ronde-bosse, contrairement aux reliefs, n'a pas de fond. Elle se présente à tous les points de vue ; l'observateur peut en faire le tour (voir Figure A.1.2 1).

- **Relief** : Sculpture inscrite dans un plan qui, selon sa saillie, prend le nom de : relief incisé, bas-relief, relief-écrasé (*schacciato*), demi-relief, haut-relief et relief ajouré.

- **Relief incisé** : Relief où le sujet est simplement gravé, incisé dans l'épaisseur d'une surface plane (Figure A.1.2 2).

- **Relief écrasé** : relief aplati (*schacciato*). Relief de très faible épaisseur, sculpté avec une extrême finesse pour produire une impression de perspective réaliste (Figure A.1.2 2).

- **Bas-relief** : Relief dont les différentes formes en saillie qui adhèrent ou non à fond plat, convexe ou concave, représentent moins de la moitié du volume réel d'un corps ou d'un objet (Figure A.1.2 3).
- **Demi-relief** : relief dont les formes ont une saillie proportionnelle à la moitié de leur volume.
- **Haut-relief** : ou « demi-bosse ». Relief dont les formes en saillie, qui adhèrent ou non à un fond plat, représentent plus de la moitié du volume réel d'un corps ou d'un objet sans excéder les trois-quarts de son volume. Dans un haut-relief avec fond, les figures ont des parties entièrement dégagées du fond et n'ont parfois avec celui-ci que quelques points de contact (Figure A.1.2 3).

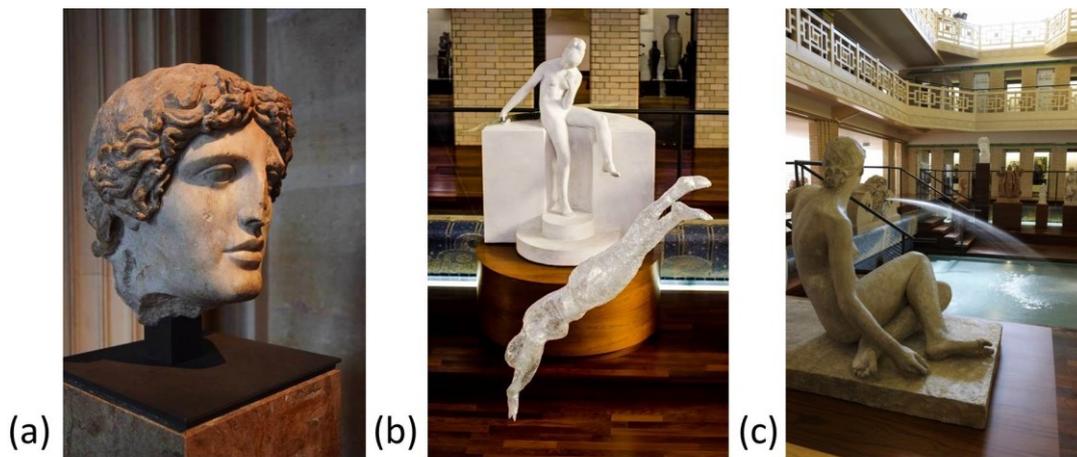


Figure A.1.2 1 – Exemples de sculptures en ronde-bosse. (a) Tête d'Apollon en marbre, du type dit « de l'Apollon de Cassel ». D'après Phidias, Grèce, II<sup>ème</sup> siècle après J.-C. Musée du Louvre. Image : M. Page, C2RMF, 2018. (b) et (c) Œuvres présentées à La Piscine, Roubaix, dont une installation temporaire des étudiants de l'ESAAT en scotch et en nylon. Images : La Piscine.

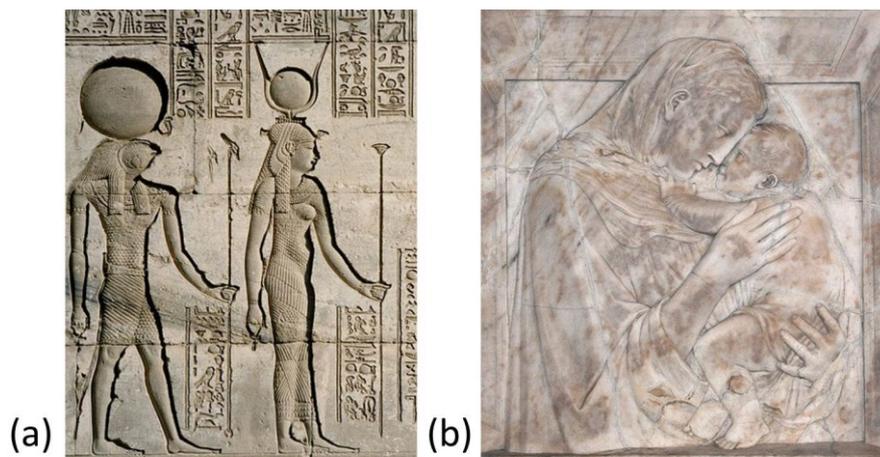


Figure A.1.2 2 – (a) Relief incisé égyptien, temple d'Hathor, Dendérah. (b) Relief écrasé ; Madone Pazzi, Donatello, 1420-1430, Bode-Museum. Images : wikipédia.com.

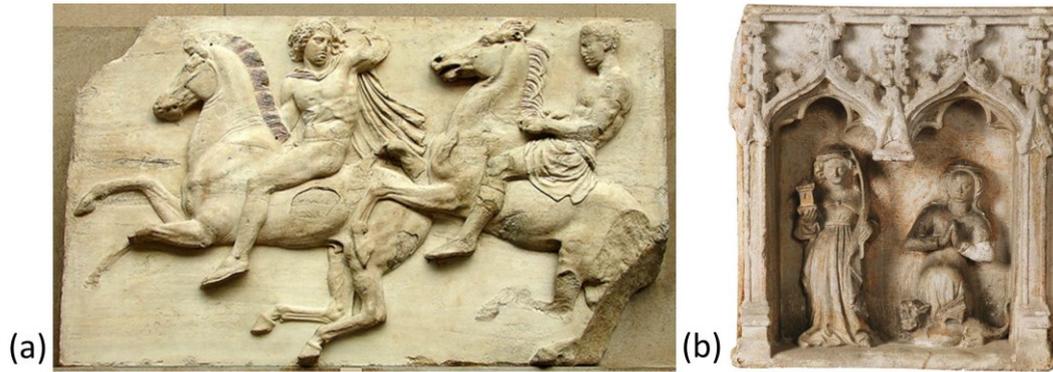


Figure A.1.2 3 – (a) Bas-relief, frise du Parthénon, Phidias, 442-438 av. J.-C., conservé au British Museum, Londres. Image : wikipédia.com. (b) Haut-relief représentant sainte Barbe et sainte Marguerite, 1500. Image : elogedelart.canalblog.com.

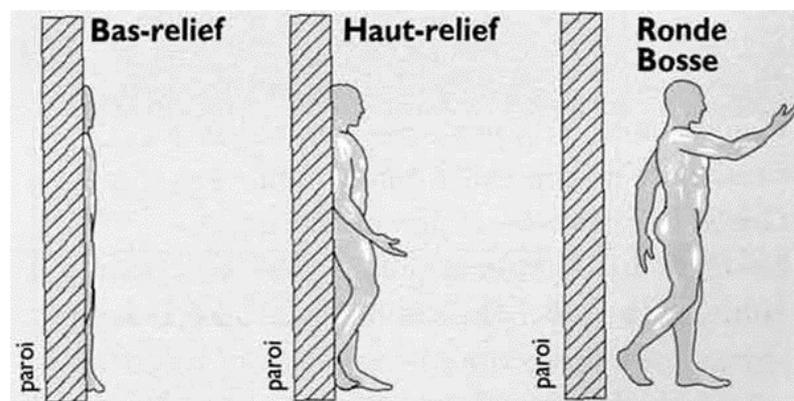


Figure A.1.2 4 – Bas-relief, haut-relief et ronde bosse. Image : Dictionnaire de l'art, de la curiosité et du bibelot, Ernest Bosc, Paris, 1883.

- **Dépouille** : Pente présentée par certaines parties d'un moule qui facilite sa sortie du moule (Figure A.1.2 5).
- **Contre-dépouille** : Légère pente ou creux présentés par certaines parties d'un modèle qui rend difficile son extraction du moule (Figure A.1.2 5). Si l'impression 3D peut créer des formes qui possèdent des contre-dépouilles, ce n'est pas le cas de l'impression 2.5D...

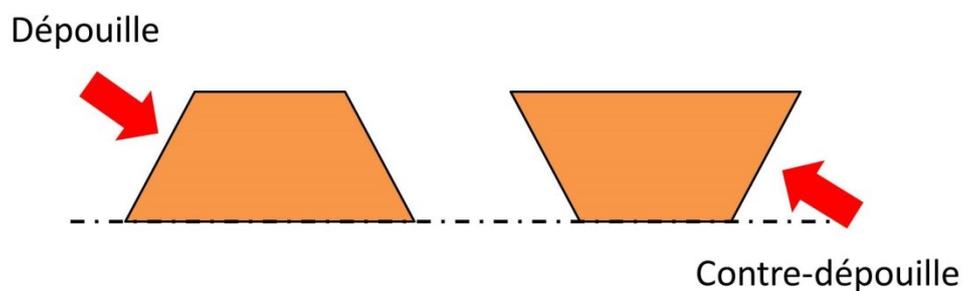


Figure A.1.2 5 – Dépouille et contre-dépouille.



## Annexe A.2 1 Métrologie du glossmètre

### 1. Données constructeur

Le glossmètre que nous avons utilisé est le modèle MG268-F2 de la marque chinoise KSJ™. La certification a été établie en 2013 ; elle était supposée rester valide 1 an. Aucune certification n'a pourtant été établie par la suite.

Valeurs de référence du verre selon les angles d'incidence		
20°	60°	85°
95.7 GU	96.7 GU	99.6 GU

Table A.2.1 1 – Valeurs références de gloss du plan étalon en verre aux trois angles de mesure du brillant spéculaire, 20°, 60° et 85°.

Taille du spot de mesure		
20°	60°	85°
9 x 10 mm <sup>2</sup>	9 x 16 mm <sup>2</sup>	5 x 39 mm <sup>2</sup>

Table A.2.1 2 – Tailles des spots de mesure aux trois angles de mesure du brillant spéculaire, 20°, 60° et 85°.

Le certificat de calibrage fait état de mesures réalisées sur trois échantillons, plus ou moins brillants. Les mesures sont données par la Table A.2.1 3.

	KSJ 1094			KSJ 0952			KSJ 1019		
	20°	60°	85°	20°	60°	85°	20°	60°	85°
Valeur attendue	91.7	94.8	99.2	15.0	52.2	79.0	2.8	19.2	40.0
Valeur mesurée	91.7	94.8	99.2	14.8	52.1	79.0	2.7	19.0	40.3

Table A.2.1 3 – Valeurs attendues et valeurs mesurées pour trois échantillons, de brillant élevé (KSJ 1094), de brillant intermédiaire (KSJ 0952) et de brillant modéré (KSJ 1019).

Les données métrologiques sont indiquées Table A.2.1 4 pour l'angle de mesure 60°.

Résolution	Répétabilité	Reproductibilité	Déviations	Déviations au zéro
0.1 GU	0.2 GU	0.5 GU	± 1.5 GU	0.2 GU

Table A.2.1 4 – Données métrologiques de certificat de calibrage de 2013.

### 2. Bilan d'incertitudes

Nous avons réalisé  $n = 50$  mesures sur un échantillon très mat, donné à 2 GU, de couleur grise, qui fait partie d'une charte disponible chez NCS<sup>19</sup>. Le résultat de ces 50 mesures est

<sup>19</sup> NCS™ gloss scale : <https://ncscolor.com/product/ncs-gloss-scale/>.

donné Figure A.2.1 1. Seul l'angle de mesure 60° est considéré. On précise qu'elles ont été effectuées en soulevant et reposant le glossmètre entre chaque mesure.

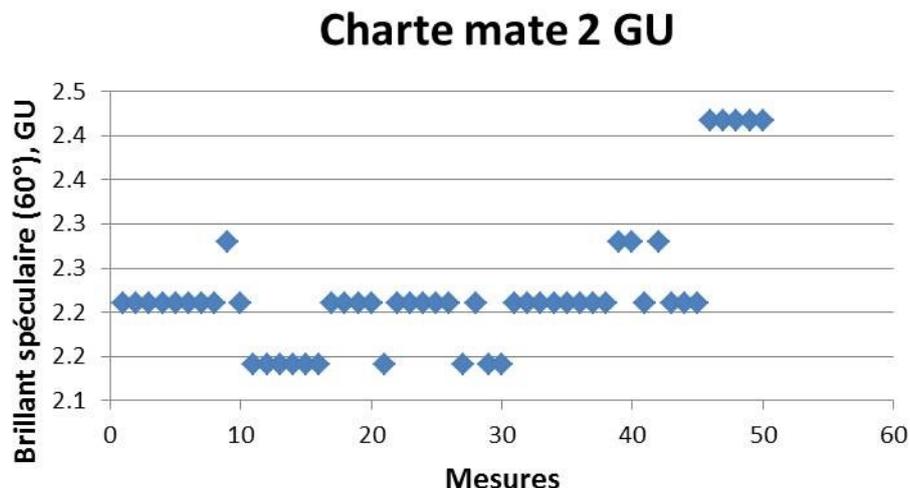


Figure A.2.1 1 – Brillant spéculaire à 60° mesuré 50 fois sur la charte NCS grise mate.

La moyenne de ces mesures vaut  $g_{moy} = 2.22272$  GU et l'écart-type  $\sigma = 0.07474$ .

- La **reproductibilité** se calcule sur l'ensemble de nos 50 mesures. L'incertitude associée est égale à l'incertitude dite « de type A » et s'écrit :

$$u_{rep} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 0.01057$$

- La **résolution** est donnée à 0.1 GU par le constructeur. L'incertitude qui lui est associée vaut donc :

$$u_{res} = \frac{Res}{2\sqrt{3}} = 0.02887$$

- La **déviatiion** s'écrit comme :

$$dev = \pm 1.5 \times \frac{gloss}{100}$$

L'incertitude qui lui est associée est donnée par :

$$u_{dev} = \frac{dev}{\sqrt{3}}$$

Dans notre cas, on a :

$$u_{dev} = \frac{\pm 1.5}{\sqrt{3}} \times \frac{g_{moy}}{100} = 0.01925$$

- La **déviatiion au zéro** (offset) correspond à l'exactitude de la mesure. Elle vaut 0.2 GU d'après la documentation constructeur. L'incertitude qui lui est associée s'écrit :

$$u_{ex} = \frac{0.2}{2\sqrt{3}} = 0.05773$$

L'incertitude type sur la mesure du brillant vaut alors :

$$u_{type} = \sqrt{u_{rep}^2 + u_{res}^2 + u_{dev}^2 + u_{ex}^2} = 0.07$$

En pratique, au cours de notre étude, nous avons réduit les mesures à 5 mesures dans 4 directions différentes, soit 20 mesures par échantillons. Dans ce cas ( $n = 20$  mesures), on a  $g_{moy} = 2.19302$  GU et l'écart-type  $\sigma = 0.03799$ . Le bilan d'incertitudes donne :

$u_{rep}$	$u_{res}$	$u_{dev}$	$u_{ex}$
0.00849	0.02887	0.01899	0.05773

Table A.2.1 5 – Bilan d'incertitudes effectué sur un panel de 20 mesures de brillant spéculaire à 60°.

Ce qui donne à nouveau  $u_{type} = 0.07$  GU.

Les résultats mats établis dans notre manuscrit sont donc de la forme :

$$g = X,XX (7)GU$$

L'incertitude porte sur le deuxième chiffre après la virgule. Notons que la composante principale dans le bilan d'incertitudes est liée à l'exactitude, i.e. la déviation au zéro. Toutefois dans le cadre de notre étude, cette incertitude ne compte pas : nous ne faisons que des comparaisons entre échantillons, tous mesurés avec le même glossmètre. L'incertitude type diminue en conséquence :  $u_{type} = 0.03$  GU.



## Annexe A.2 2 Métrologie de la station de microtopographie

Au cours des trois années de thèse, nous avons utilisé trois stations de microtopographie différentes. En 2016, la station n°1, fixe, fournie par Stil™, nous a permis d'effectuer nos premières mesures. Elle a été remplacée en 2017 par un équipement mobile temporaire fourni par Altimet™ (la station n°2), lui-même à son tour remplacé par la station définitive n°3.

	Station 1	Station 2	Station 3
Fabricant	Stil™	Altimet™	Altimet™
Modèle	CHR-150N	Altisurf 50	Altisurf 50
Année d'utilisation	2016	2017	2018
Chapitres concernés	B.2	B.1, B.3	B.4, C.2
Mobilité	fixe	transportable	transportable
Pas de mesure	0.156 $\mu\text{m}$	0.156 $\mu\text{m}$	0.999 $\mu\text{m}$
Amplitude de la sonde reliée	300 $\mu\text{m}$	600 $\mu\text{m}$	600 $\mu\text{m}$

Table A.2.2 1 – Caractéristiques des stations de microtopographies utilisées au C2RMF lors de l'étude.

La résolution des capteurs utilisés est donnée par les constructeurs entre 5 et 10 nm, selon les sondes. Cela est bien inférieur aux reliefs que nous aurons à scanner. Nous n'avons trouvé aucun document constructeur spécifiant les données métrologiques relatives à chacun de ces instruments... Nous avons donc procédé à une évaluation des incertitudes en reproduisant des mesures sur un support identique.

### 1. Protocole

Pour effectuer notre analyse, nous utilisons un petit standard en verre de la marque Mahr™. Des sillons métalliques sont gravés sur la surface en verre, formant un profil sinusoïdal (Figure A.2.2 1).



Fabricant	Mahr™
Modèle	mire PGN 3
Au cut-off $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$ :	
$R_a$	0.90 $\mu\text{m}$
$R_z$	3.30 $\mu\text{m}$

Table A.2.2 2 – Mire Mahr™ utilisée lors de l'étude métrologique. Ses valeurs de rugosité  $R_a$  et  $R_z$  sont données par le constructeur au cut-off  $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$ .

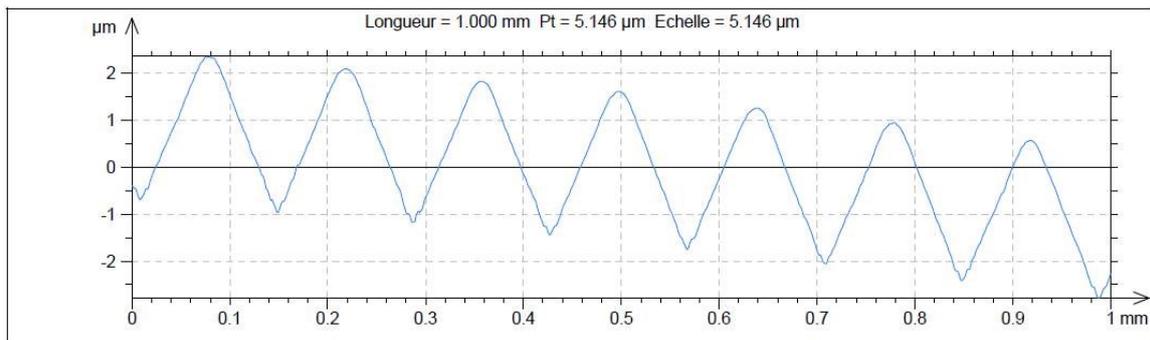


Figure A.2.2 1 – Exemple de profil obtenu sur la mire Mahr<sup>TM</sup> avec la sonde optique de profondeur 600 µm.

Les valeurs  $R_a$  et  $R_z$  données par le constructeur au cut-off  $\lambda_c = 0.8$  mm ne peuvent être considérées comme des « valeurs vraies » puisque le certificat de calibration de la mire remonte à plusieurs années. Nous les donnons dans la suite à titre indicatif.

Un ensemble de mesures a été systématiquement effectué avec chacun des instruments afin d'évaluer l'incertitude de type A de nos mesures : on cherche ainsi à estimer les grandeurs  $R_a$  et  $R_z$  à partir de séries statistiques. Les résultats sont donnés ci-après.

## 2. Station n°1 Stil<sup>TM</sup>

Le capteur CHR-150N est relié à une sonde d'amplitude 300 µm, ce qui est suffisant pour mesurer des gravures de quelques micromètres d'amplitude. Une série de 15 mesures a été réalisée, grâce à laquelle nous évaluons la reproductibilité sur le calcul de  $R_a$  et  $R_z$ . Les résultats sont donnés Figure A.2.2 2, Figure A.2.2 3 et Table A.2.2 3.

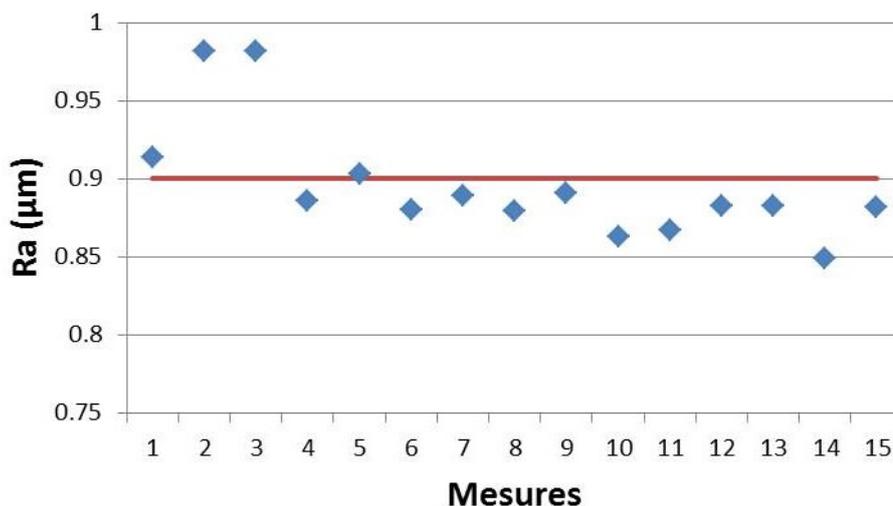


Figure A.2.2 2 – Valeurs de  $R_a$  calculées par le logiciel Mountains Map<sup>TM</sup> pour les 15 mesures effectuées sur la mire Mahr<sup>TM</sup> avec la station 1. En rouge est indiquée la valeur de  $R_a$  spécifiée par le constructeur.

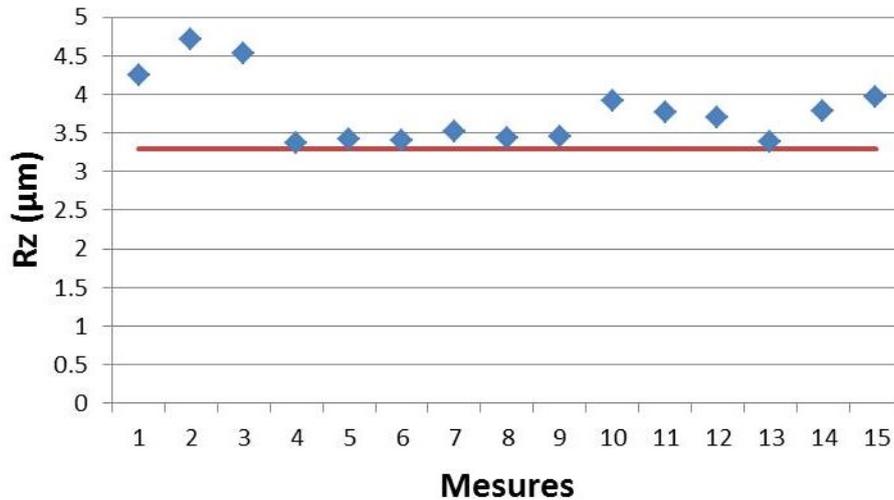


Figure A.2.2 3 – Valeurs de  $R_z$  calculées par le logiciel Mountains Map™ pour les 15 mesures effectuées sur la mire Mahr™ avec la station 1. En rouge est indiquée la valeur de  $R_z$  spécifiée par le constructeur.

	Valeur moyenne	Ecart-type	Incertitude de type A
$R_a$	$R_{a\ moy} = 0.8955333\ \mu\text{m}$	$\sigma_a = 0.0383161\ \mu\text{m}$	$u_{Ra} = 0.00989318\ \mu\text{m}$
$R_z$	$R_{z\ moy} = 3.7726667\ \mu\text{m}$	$\sigma_z = 0.4315498\ \mu\text{m}$	$u_{Rz} = 0.11142568\ \mu\text{m}$

Table A.2.2 3 – Moyennes, écarts-types et incertitudes déduites des 15 mesures effectuées avec la station 1.

On devra donc écrire :

$$R_{a\ moy} = 0.89\ (1)\ \mu\text{m}$$

$$R_{z\ moy} = 3.8\ (1)\ \mu\text{m}$$

Il est logique que l'incertitude soit plus élevée sur le calcul de  $R_z$  que sur celui de  $R_a$  : la détermination de la valeur  $R_z$  se fait en additionnant la valeur du pic le plus haut avec celle de la vallée la plus basse, ce qui est sujet à des variations fortes, tandis que  $R_a$  est évalué statistiquement au sein d'un même profil.  $R_a$  est donc moins sensible à des perturbations externes ou internes (poussières, point non mesuré, etc.) que  $R_z$ .

### 3. Station n°2 Altimet™

Le capteur Altimet est ici relié à une sonde d'amplitude 600 µm. Capteur et sonde sont donc différents de ceux que nous utilisons avec la station n°1. 45 mesures ont été réalisées. Les résultats sont donnés Figure A.2.2 4, Figure A.2.2 5 et Table A.2.2 4.

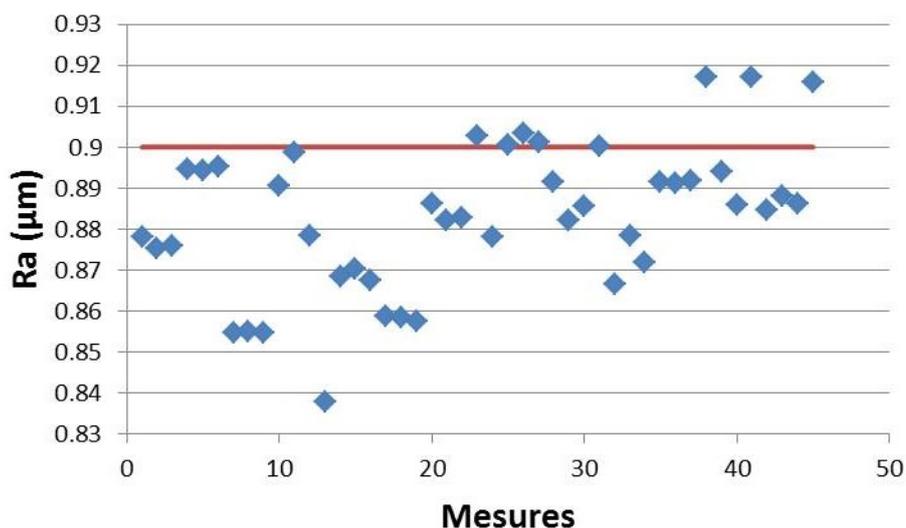


Figure A.2.2 4 – Valeurs de  $R_a$  calculées par le logiciel Mountains Map™ pour les 45 mesures effectuées sur la mire Mahr™ avec la station 2. En rouge est indiquée la valeur de  $R_a$  spécifiée par le constructeur.

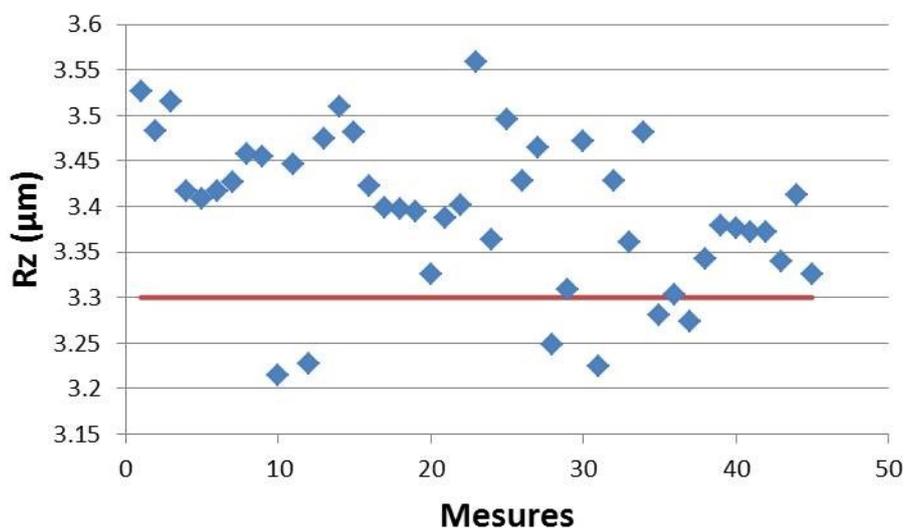


Figure A.2.2 5 – Valeurs de  $R_z$  calculées par le logiciel Mountains Map™ pour les 45 mesures effectuées sur la mire Mahr™ avec la station 2. En rouge est indiquée la valeur de  $R_z$  spécifiée par le constructeur.

	Valeur moyenne	Ecart-type	Incertitude de type A
$R_a$	$R_{a moy} = 0.8831089 \mu\text{m}$	$\sigma_a = 0.0177222 \mu\text{m}$	$u_{Ra} = 0.00264187 \mu\text{m}$
$R_z$	$R_{z moy} = 3.3955111 \mu\text{m}$	$\sigma_z = 0.0840870 \mu\text{m}$	$u_{Rz} = 0.01253495 \mu\text{m}$

Table A.2.2 4 – Moyennes, écarts-types et incertitudes déduites des 45 mesures effectuées avec la station 2.

On écrira donc :

$$R_{a moy} = 0.883 (3) \mu\text{m}$$

$$R_{z moy} = 3.39 (1) \mu\text{m}$$

L'incertitude est plus faible qu'avec la station 1, évaluée sur  $R_a$  comme sur  $R_z$ .

#### 4. Station n°3 Altimet™

Le capteur Altimet est à nouveau relié à une sonde d'amplitude 600  $\mu\text{m}$ , mais l'instrumentation est différente. 45 mesures ont été réalisées. Les résultats sont donnés Figure A.2.2 6, Figure A.2.2 7 et Table A.2.2 5.

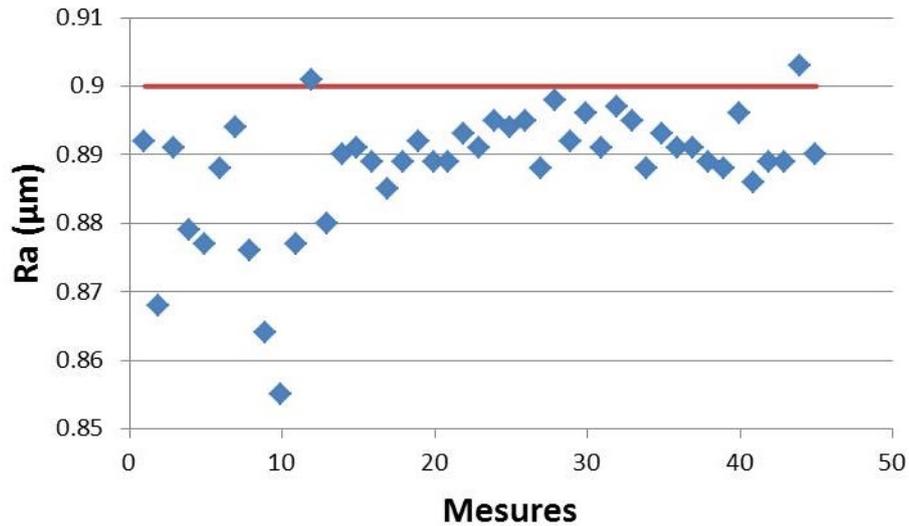


Figure A.2.2 6 – Valeurs de  $R_a$  calculées par le logiciel Mountains Map™ pour les 45 mesures effectuées sur la mire Mahr™ pour la station 3. En rouge est indiquée la valeur de  $R_a$  spécifiée par le constructeur.

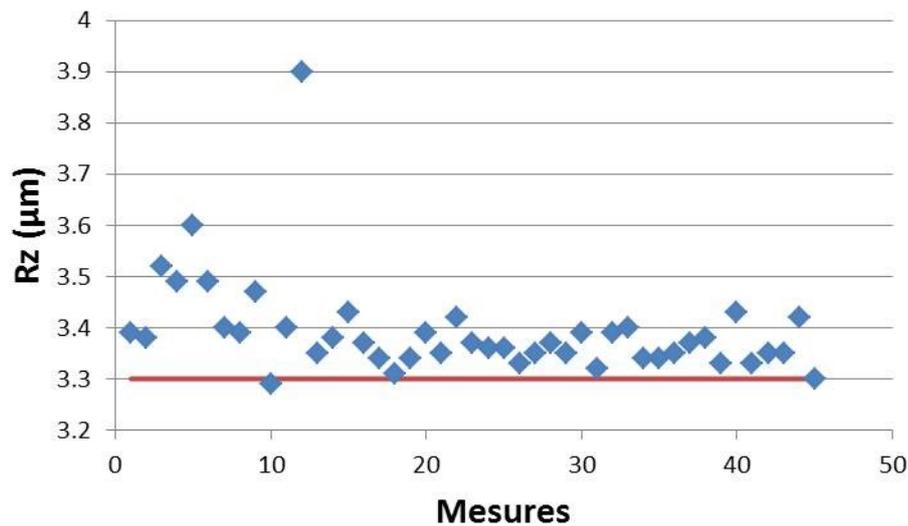


Figure A.2.2 7 – Valeurs de  $R_z$  calculées par le logiciel Mountains Map™ pour les 45 mesures effectuées sur la mire Mahr™ pour la station 3. En rouge est indiquée la valeur de  $R_z$  spécifiée par le constructeur.

	Valeur moyenne	Ecart-type	Incertitude de type A
$R_a$	$R_{a\ moy} = 0.8883111\ \mu\text{m}$	$\sigma_a = 0.0091622\ \mu\text{m}$	$u_{Ra} = 0.00136582\ \mu\text{m}$
$R_z$	$R_{z\ moy} = 3.3928889\ \mu\text{m}$	$\sigma_z = 0.0974125\ \mu\text{m}$	$u_{Rz} = 0.01452140\ \mu\text{m}$

Table A.2.2 5 – Moyennes, écarts-types et incertitudes déduites des 45 mesures effectuées avec la station 3.

On écrira donc cette fois :

$$R_{a\ moy} = 0.888\ (1)\ \mu\text{m}$$

$$R_{z\ moy} = 3.39\ (1)\ \mu\text{m}$$

L'incertitude est plus faible qu'avec la station 2, évaluée sur  $R_a$  comme sur  $R_z$ .

## 5. Conclusion

L'incertitude calculée sur  $R_a$  et  $R_z$  pour les stations 2 et 3 est inférieure à celle calculée pour la station 1 : la station 3 ayant été achetée pour remplacer la n°1, c'est bien. Au cours de notre étude, les mesures de rugosité en profil et en surface ont toutes été effectuées avec les stations 2 et 3 : la station 1 n'a servi qu'à effectuer des mesures de hauteurs et non de rugosité.

Au sujet des hauteurs, leur calcul est différent puisqu'il nécessite l'intervention de l'utilisateur qui doit placer un curseur au niveau du profil dont il souhaite connaître l'élévation. Le placement de ce curseur avec la souris entraîne une nouvelle incertitude, évaluée à environ 1  $\mu\text{m}$ , ce qui est non négligeable, qui tombe à 0.1  $\mu\text{m}$  lorsque l'utilisateur zoome sur le profil avant de placer le curseur.

## Annexe B.2 1 Fonctions de transfert d'échantillons à faibles hauteurs

Dans le chapitre B.2, nous avons présenté les résultats obtenus pour des échantillons formés de plusieurs couches d'encre (mélange d'encre, couches blanches, puis couches de cyan superposés) et formant des bandes à deux niveaux : la hauteur des bandes basses comme celle des bandes hautes variaient. Afin d'introduire la suite de l'étude, nous présentons ici les fonctions de transfert obtenues pour des échantillons plus proches de ceux que nous créerons dans le chapitre B.3.

Nous réduisons le nombre de patches à analyser en microtopographie à 16, à raison de 3 profils par patch. Les bandes sont orientées dans la direction 1, qui correspond au mouvement du chariot de l'imprimante. Les variables sont les suivantes :

- 4 fréquences (10, 30, 50 et 75 paires de lignes par pouce) ;
- 4 hauteurs hautes : 25  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 65  $\mu\text{m}$  et 80  $\mu\text{m}$ . Les bandes basses sont toutes imprimées à la hauteur 5  $\mu\text{m}$  (offset fixe).
- Seul le plus petit niveau de gouttes est utilisé.
- Le temps d'illumination aux UV est laissé au plus faible niveau.

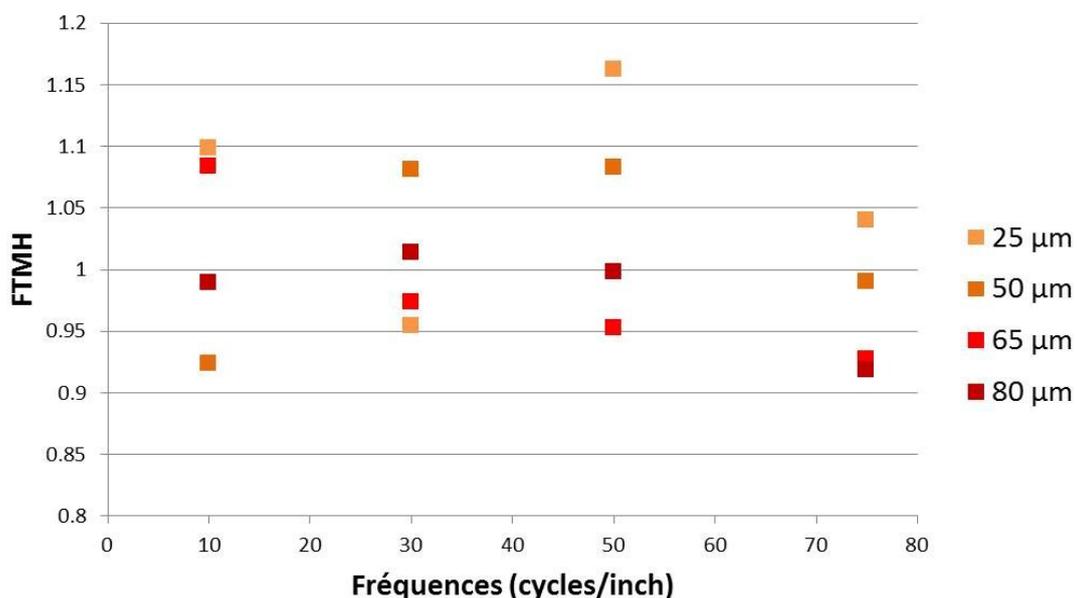


Figure B.2.1 1 – Fonctions de transfert de modulation en hauteurs pour les 4 fréquences considérées, aux 4 hauteurs des bandes.

La Figure B.2.1 1 montre que les fonctions de transfert s'éloignent peu de la valeur 1. A ces hauteurs de bandes, la FTMH n'est que peu impactée par l'augmentation de la fréquence spatiale. On voit tout de même que la FTMH calculée pour les bandes à 80  $\mu\text{m}$  entame une

décroissance après la fréquence de 50 cycles / pouce. Celle-ci peut être modélisée par la courbe de la Figure B.2.1 2, qui s'écrit avec un coefficient de Pearson à 97% comme :

$$HMTF(\nu) = \frac{1.00}{\sqrt{1 + \left(\frac{\nu}{90.87}\right)^{8.67}}} \quad (\text{E.B.2.1})$$

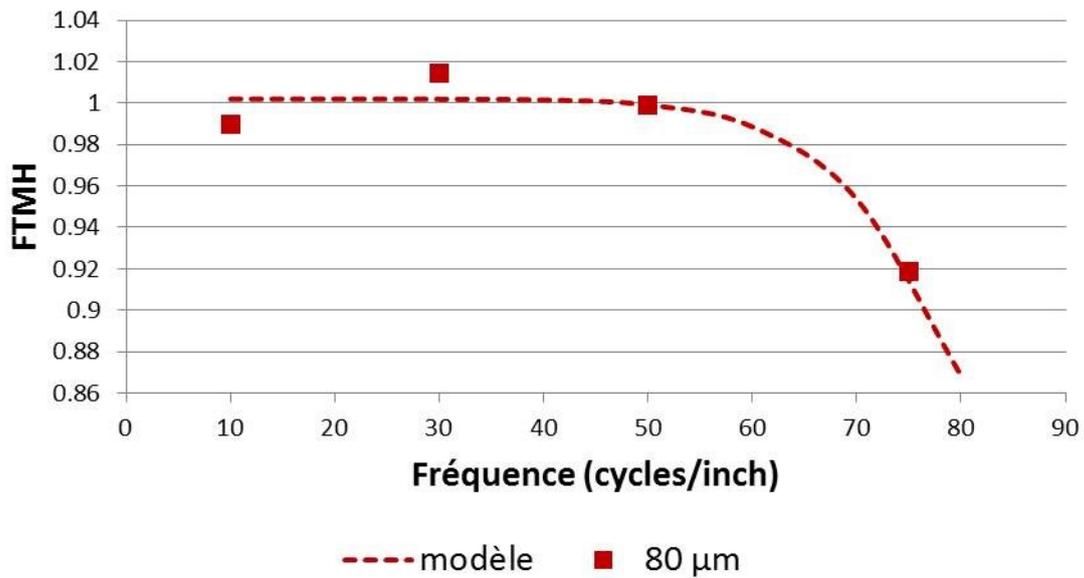


Figure B.2.1 2 – Fonctions de transfert de modulation en hauteurs pour les 4 fréquences considérées, à la hauteur de bandes 80 μm, et courbe modèle.

Plus la fréquence augmente, plus la FTMH va décroître ; toutefois les variations sont ici trop limitées pour compter.

## Annexe B.2 2 Directions d'impression

En réduisant le nombre de patches imprimés à 16, soit 4 fréquences et 4 couples de hauteurs, on peut rapidement évaluer la différence entre les performances de l'imprimante lorsque le motif est formé selon la direction 1, la direction du mouvement du chariot d'impression, et la direction 2. Ces deux directions sont rappelées par la Figure B.2.2 1.

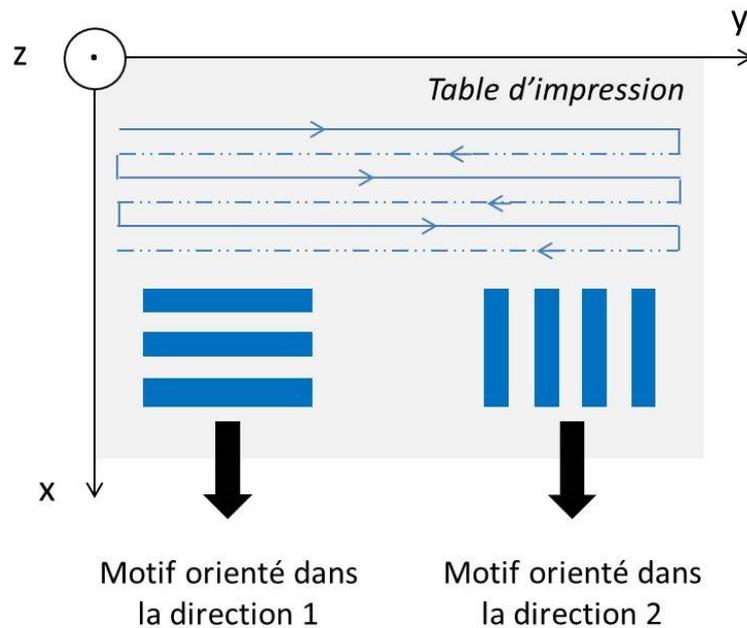


Figure B.2.2 1 – Directions d'impression des motifs. Le chariot de l'imprimante se déplace selon la direction 1.

Les patches sont imprimés sans offset (la hauteur des bandes basses est fixée à 5  $\mu\text{m}$ ). Les bandes hautes sont imprimées aux hauteurs 25  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 65  $\mu\text{m}$  et 80  $\mu\text{m}$ . Les fréquences sont fixées à 10, 30, 50 et 75 paires de lignes par pouce. Seul le plus petit niveau de gouttes est utilisé.

La Figure B.2.2 2 et la Figure B.2.2 3 donnent les fonctions de transfert de modulation en hauteurs obtenues dans la direction 1 et la direction 2 respectivement. Si dans la direction 1, les valeurs obtenues ne s'écartent que très légèrement de l'unité, ce n'est pas le cas pour la direction 2 : les courbes présentent une nette décroissance, pour toutes les hauteurs implémentées, dès la fréquence de 30 cycles / pouce.

Avec 16 patches seulement, on a obtenu ici une représentation graphique des performances de l'imprimante dans les deux directions. La direction 1 est à privilégier.

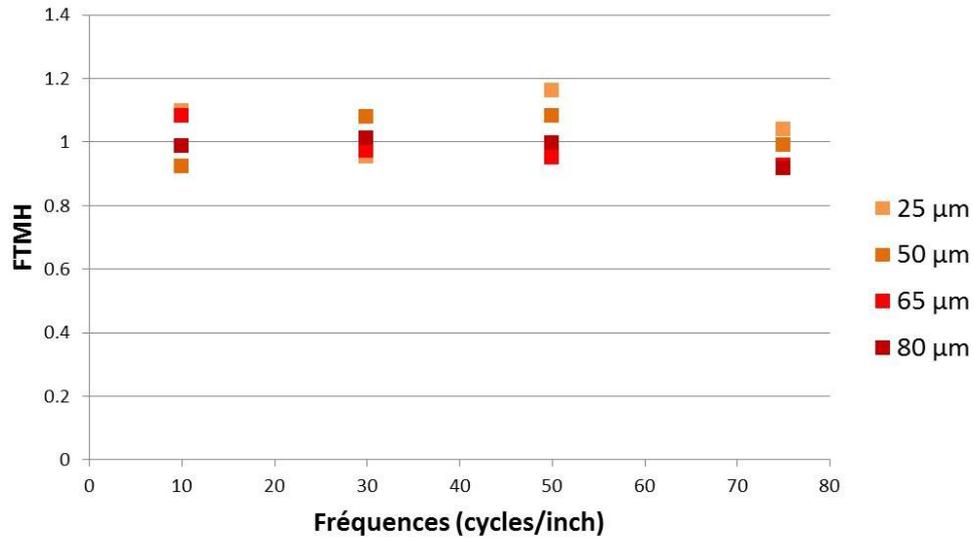


Figure B.2.2 2 – Fonctions de transfert de modulation en hauteurs pour les 4 fréquences considérées, aux 4 hauteurs des bandes, imprimées dans la direction 1.

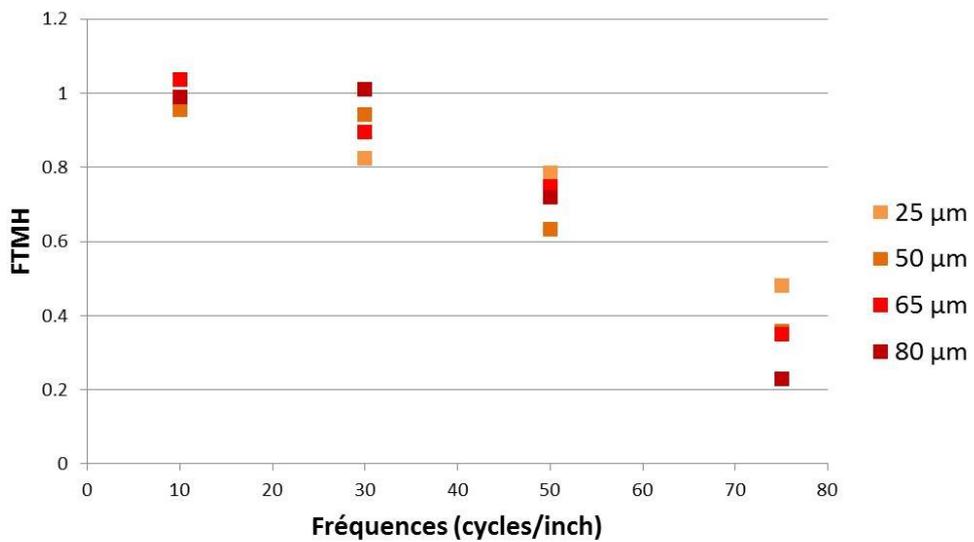


Figure B.2.2 3 – Fonctions de transfert de modulation en hauteurs pour les 4 fréquences considérées, aux 4 hauteurs des bandes, imprimées dans la direction 2.

## Annexe B.3 1 Gamme de brillant accessible

Au cours de notre travail, nous nous sommes concentrés sur la réduction des aspects de brillant. Mais nous avons également regardé dans quelle mesure nous pouvions augmenter le brillant des encres. Finalement, pour un brillant neutre des encres (sans sous-couche, sans piliers, sans vernis) qui vaut environ 18 GU, descendre dans le mat tout comme monter dans le très brillant n'est pas évident. Nous présentons dans cette annexe les autres stratégies mises en place pour modifier le brillant des encres.

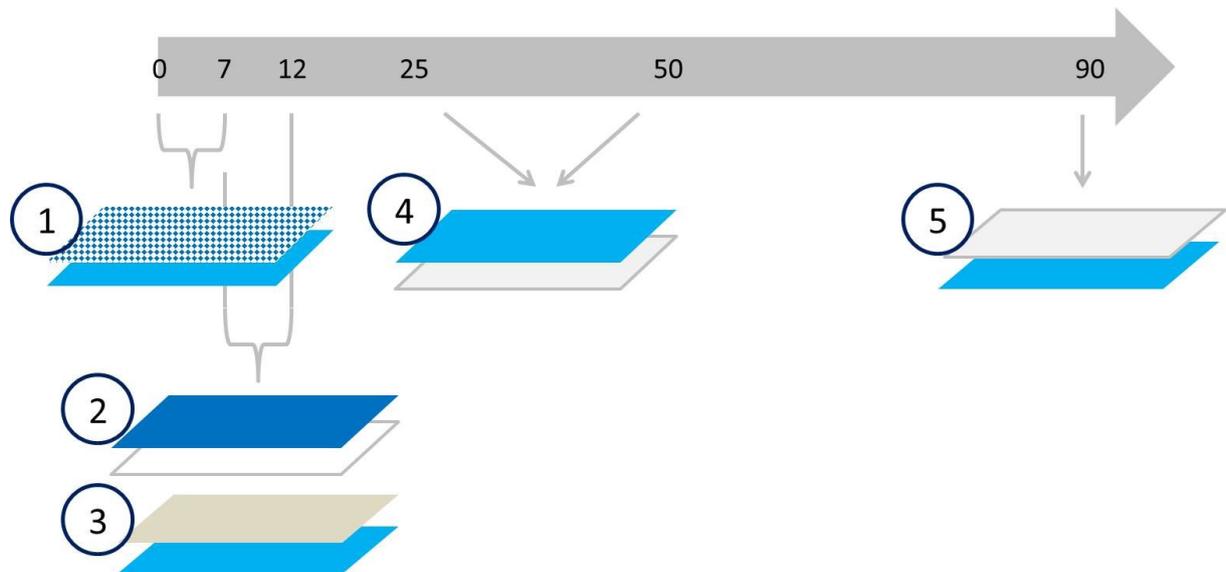


Figure B.3.1 1 – Etendue du brillant accessible. L'échelle indique les unités de gloss (GU).

### 1. Stratégie 1 : 0 – 7 GU (*full matte à matte*)

Cette méthode est décrite dans le chapitre B.3. En créant de petits piliers d'encre, on modifie suffisamment la rugosité pour que les niveaux de brillants diminuent nettement.

### 2. Stratégies 2 et 3 : 7 – 12 GU (*matte à semi-matte*)

La stratégie n°2 consiste à superposer des couches d'encre cyan sur des couches d'encre blanche. En faisant varier les épaisseurs relatives de blanc et de cyan, on peut jouer sur le brillant des encres.

Dans la stratégie n°3, du vernis (brillant) est superposé à une couche cyan. En modifiant l'épaisseur de vernis, on modifie le brillant. Le vernis est appliqué comme une encre classique ; il polymérise sous rayonnement UV.

### 3. Stratégie 4 : 25 – 50 GU (*satin à semi-glossy*)

Il existe un autre moyen pour appliquer le vernis, qui consiste à ne pas le sécher immédiatement. Lors d'une passe d'impression normale, l'encre ou le vernis est appliquée, séchée, appliquée, séchée, sur l'ensemble de la surface, puis le chariot repasse sur la surface pour la sécher une dernière fois. Lors d'une passe spéciale, le séchage n'intervient qu'en dernière étape ; le vernis est appliqué totalement avant de polymériser. Il s'étale ainsi sur l'ensemble de la surface. Le résultat visuel est alors beaucoup plus brillant qu'après une passe de vernis traditionnelle. Nous appelons ce mode d'application du vernis le « High Gloss Varnish Mode » (HGVM).

Dans la stratégie 4, une couche de vernis en HGVM est imprimée, puis différents types de couches lui sont superposées.

Sous-couche	Couche supérieure	Brillant à 60° (GU)
Vernis HGVM	Cyan demi-ton	12.4
Vernis HGVM	Cyan 100 %	25.6
Vernis HGVM	Cyan à motifs périodiques	50.6

Table B.3.1 1 – Paramètres d'impression et brillant spéculaire mesuré à 60°.

Selon la couche appliquée sur la sous-couche en vernis HGVM, le brillant varie. Le demi-ton apporte une rugosité à la surface qui diminue son brillant malgré la présence du vernis en sous-couche. Lorsque la surface est totalement recouverte d'encre cyan, la présence de la sous-couche très brillante augmente l'aspect brillant de l'échantillon. Enfin, l'application de motifs périodiques de 112 µm de large, séparés par des blancs de 56 µm, tels que la couverture en encre soit de 44 %, est suffisamment peu couvrante pour que le glossmètre perçoive la réflexion du vernis.

Notons toutefois que ce mode d'impression du vernis n'est pas recommandé car le temps de séchage long favorise le dépôt de particules de poussière ou la formation de bulles.

### 4. Stratégie 5 : 90 GU (*full gloss*)

Ici, le vernis HGVM est appliqué sur l'encre cyan. Le niveau de brillant passe au-dessus des 90 GU.

## 5. Conclusion

Ces quelques essais pour appréhender la gamme de brillant accessible sur l'imprimante ont montré qu'il n'était pas évident de changer, en mat comme en brillant, l'aspect naturellement semi-brillant des encres.

## Annexe B.4 1 Mélanges à deux encres

Les figures présentées ici donnent le brillant spéculaire à 60° en fonction des pourcentages respectifs d'encre. Seuls les mélanges à deux encres sont présentés : Jaune – Magenta, Cyan – Magenta, Noir – Cyan, Noir – Magenta et Noir – Jaune.

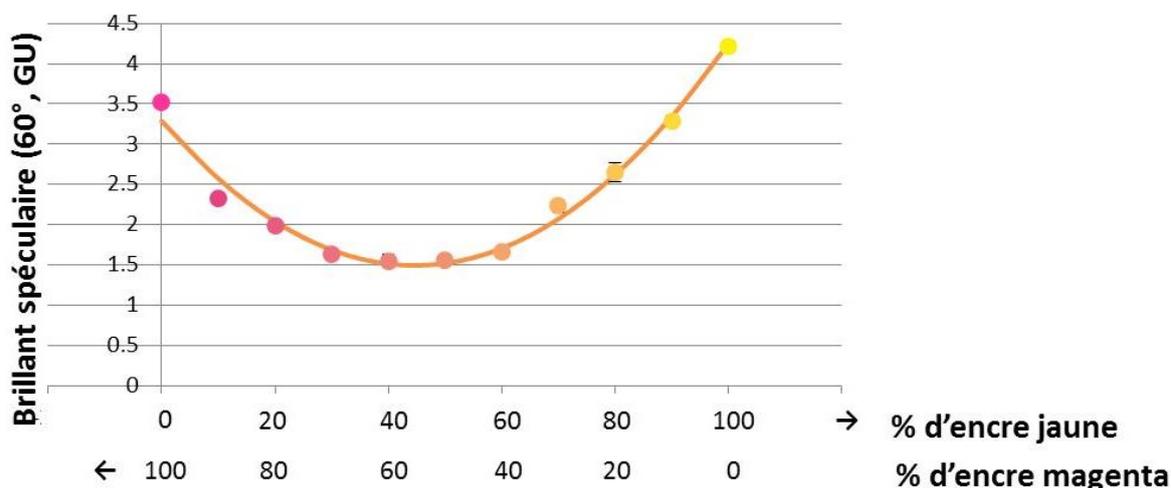


Figure B.4.1 1 – Brillant spéculaire à 60° de la charte Magenta – Jaune ; points mesurés et modèle empirique déduit. Les pourcentages en encre magenta décroissent tandis que les pourcentages en encre jaune augmentent, comme indiqué sur l'échelle de l'axe des abscisses.

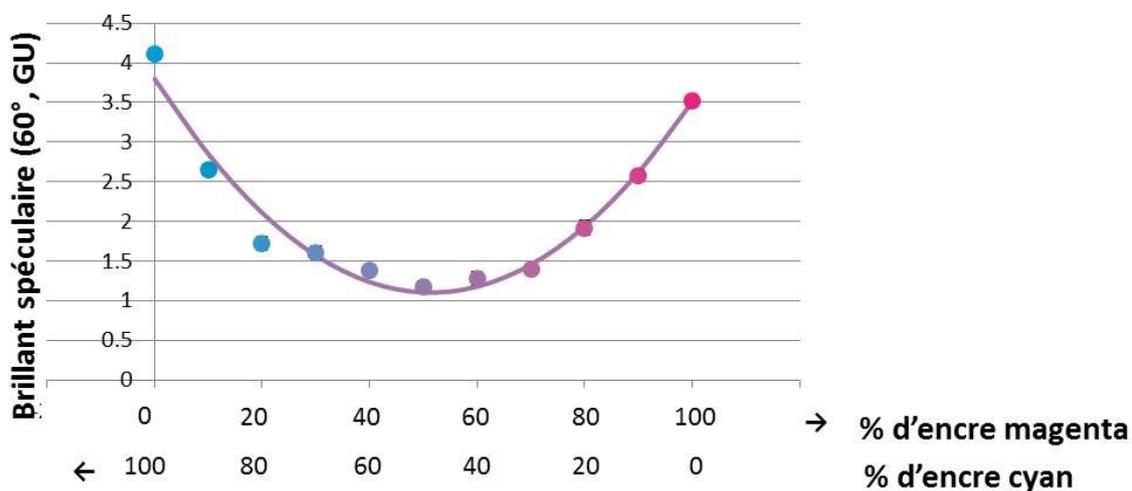


Figure B.4.1 2 – Brillant spéculaire à 60° de la charte Cyan – Magenta ; points mesurés et modèle empirique déduit. Les pourcentages en encre cyan décroissent tandis que les pourcentages en encre magenta augmentent, comme indiqué sur l'échelle de l'axe des abscisses.

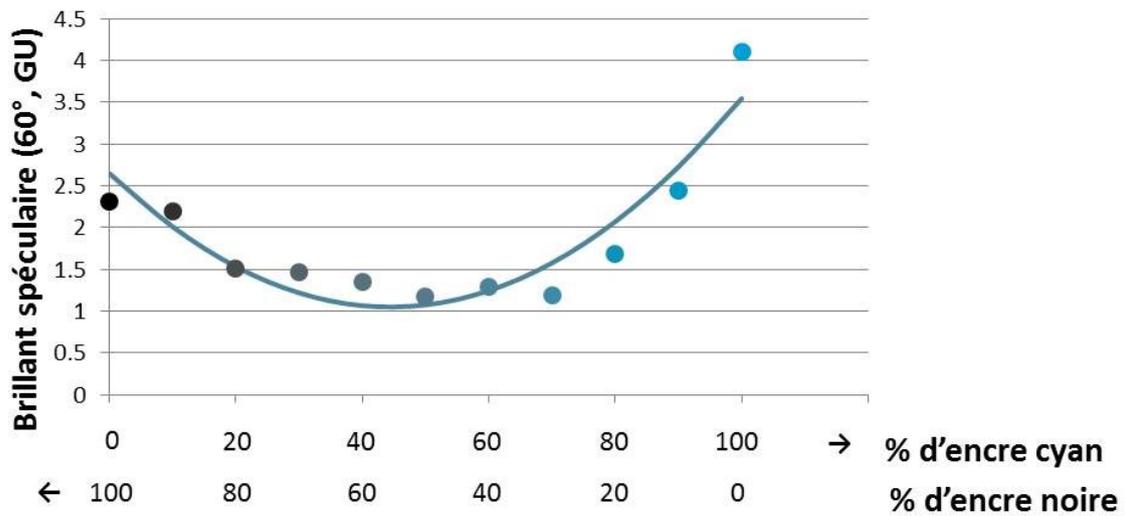


Figure B.4.1 3 – Brillant spéculaire à 60° de la charte Noir – Cyan ; points mesurés et modèle empirique déduit. Les pourcentages en encre noire décroissent tandis que les pourcentages en encre cyan augmentent, comme indiqué sur l'échelle de l'axe des abscisses.

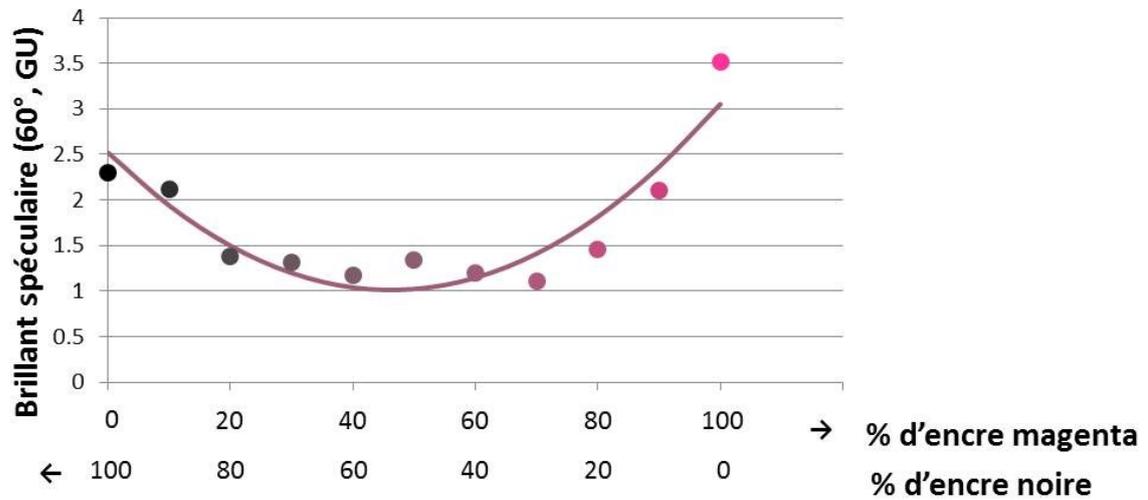


Figure B.4.1 4 – Brillant spéculaire à 60° de la charte Noir – Magenta ; points mesurés et modèle empirique déduit. Les pourcentages en encre noire décroissent tandis que les pourcentages en encre magenta augmentent, comme indiqué sur l'échelle de l'axe des abscisses.

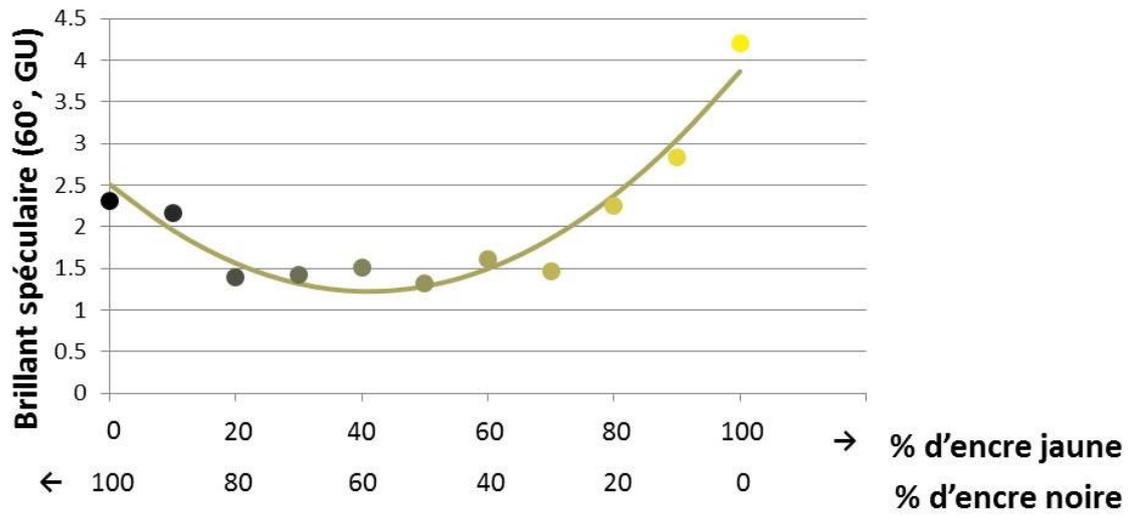


Figure B.4.1 5 – Brillant spéculaire à 60° de la charte Noir – Jaune ; points mesurés et modèle empirique déduit. Les pourcentages en encre noire décroissent tandis que les pourcentages en encre jaune augmentent, comme indiqué sur l'échelle de l'axe des abscisses.



## Annexe C.2 1 Fiche d'identification de l'œuvre

Désignation	Bandage de roue
Provenance	Moyen-Orient, Iran, Elam
Date de fabrication	vers 2000 - 1750 av. J.-C.
Période archéologique	Antiquité orientale, Iran, Elam (- 4200 ; - 600)
Matériaux	Alliage cuivreux
Dimensions	50 x 20 cm
Lieu de conservation	Musée du Louvre, département des Antiquités orientales, Paris
Institution propriétaire	Musée du Louvre, département des Antiquités orientales, Paris
Numéro d'inventaire	Sb 14679
Numéro de référence C2RMF	C2RMF76506
Responsable scientifique de l'œuvre	François Bridey, conservateur du patrimoine, département des Antiquités orientales, musée du Louvre



Figure C.2.1 1 – Élément de bandage de roue considéré. Image : A. Chauvet, C2RMF.





# Création d'objets mats : Optimisation d'un procédé d'impression en relief en termes d'apparence

## Résumé

L'impression 2.5D est une technologie à mi-chemin entre l'impression couleur traditionnelle, à laquelle elle emprunte son procédé et la qualité de reproduction des couleurs, et l'impression 3D qui crée des reliefs et des formes. Par ses qualités visuelles, elle pourrait permettre la reproduction réaliste de multiples surfaces, mais un frein s'oppose à cette perspective : les encres brillent.

En modulant la rugosité des surfaces imprimées à l'échelle du micromètre, en fréquence et en amplitude, nous avons réussi à réduire et contrôler le brillant des encres. Des stratégies d'impression différentes ont été proposées et étudiées pour diminuer l'effet scintillant et permettre l'impression d'une couche couleur mate : la création d'un espace à cinq dimensions dans lequel le brillant et la couleur sont modélisés aboutit à l'uniformisation des niveaux de brillant colorés.

Les protocoles d'impression développés ont ensuite été appliqués à des cas concrets issus de la conservation – restauration du patrimoine. Plusieurs exemples distincts sont présentés, qui abordent un point particulier sur lequel l'impression 2.5D est pertinente: comblement de lacune, création de répliques réalistes, intérêt de l'aspect visuel mat pour la lisibilité des œuvres.

**Impression 2.5D en couleurs avec encres, Réduction du brillant, Surfaces mates, Scintillement, Acquisition 3D, Rugosité à micro-échelle, BRDF, Restauration du patrimoine.**

## Résumé en anglais

2.5D printing is between traditional color printing, for the process and its visual quality, and 3D printing, which makes forms and reliefs by ink superposition. Because of its properties, 2.5D printing could allow the realistic reproduction of objects and surfaces, but inks are too glossy.

To reduce and control this glossy aspect of inks, we modulate the roughness of the printed layers, at the micro-scale, both in frequency and amplitude. Influence of parameters was measured, and different strategies were suggested to reduce sparkle and to allow the creation of matte colored layers: by constituting a 5D space where gloss and color are modeled, we can make gloss level of colored surfaces uniform.

Several case studies from the Conservation of Cultural Heritage were considered, where 2.5D printing could help the curator, the conservator or the archivist. We studied in particular the issues of the the gap filling on an archaeological object, the realistic reproduction of surfaces, and the creation of matte objects for readability.

**Glossy, Matte, Relief printing, Roughness, Color, Visual perception, BRDF, Cultural Heritage, Conservation and Restoration.**