

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONCEPTION ET FABRICATION DE DISPOSITIFS DE SÉCURITÉ OPTIQUES

BILL BALOUKAS
DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE PHYSIQUE)
AVRIL 2006

© Bill Baloukas, 2006.



Library and
Archives Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-47648-2
Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-47648-2

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

CONCEPTION ET FABRICATION DE DISPOSITIFS DE SÉCURITÉ OPTIQUES

présenté par: BALOUKAS Bill

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. SKOROBOGATIY Maksim A., Ph. D., président

M. MARTINU Ludvik, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. DOBROWOLSKI George, Ph. D., membre

REMERCIEMENTS

On ne peut passer à travers deux années de maîtrise sans avoir eu besoin, à un moment ou à un autre, d'aide. Une aide qui fût par moment technique, théorique et même psychologique ! J'aimerais tout d'abord remercier tous les gens avec qui j'ai eu le plaisir de travailler et de discuter. Plus particulièrement :

- Aram, celui qui m'a initié au domaine des couches minces et qui, par son enthousiasme, a su piquer mon intérêt. Sans oublier toute ton aide évidemment !
- Francis, pour tout le temps passé à tenter de faire fonctionner le DIBS.
- Marie-Maude et Jean-Michel, pour votre aide et vos conseils ainsi que pour nos nombreuses séances de motivation mutuelle.
- Oleg, pour nos nombreuses discussions et tes précieux conseils .
- Stéphane, pour m'avoir montré à ne pas avoir peur d'un réacteur plasma, nos nombreuses discussions, ton aide et ta disponibilité.

Merci Fanny pour l'aide que tu m'as apportée lors de la rédaction de ce mémoire.

Un grand merci à George pour ses judicieux conseils et ses mots d'encouragements.

Mes sincères remerciements à Jolanta pour vos commentaires positifs et l'appréciation que vous avez toujours montrée envers mes travaux.

J'aimerais également remercier le Fond québécois de la recherche sur la nature et les technologies ainsi que le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada pour avoir financé en grande partie mes travaux.

Finalement, je voudrais tout particulièrement remercier Ludvik, qui malgré son horaire chargé, a toujours su trouver du temps pour discuter et encadrer mon projet. La confiance que vous m'avez démontrée et les opportunités que vous m'avez offertes m'ont permis de grandir. Encore une fois, un gros merci à vous tous !

RÉSUMÉ

Aux cours des dernières années, la contrefaçon est devenue un grave problème affectant notre société et celle-ci ne cesse de croître. Afin d'y pallier, de multiples dispositifs ont été développés. La tendance générale consiste à constamment les rendre plus complexes en utilisant les technologies les plus récentes, et souvent dispendieuses, afin de décourager les contrefaiseurs.

L'utilisation de filtres optiques interférentiels (Interference security image structure - ISIS) en tant que système de sécurité optique provient du fait que leur couleur subit un changement en fonction de l'angle selon lequel on les observe. Ce changement de couleur, qui porte le nom d'iridescence, n'est pas reproductible par des techniques de reprographie telles la photocopie, l'impression, la photographie, etc. Afin d'accroître la sécurité offerte par ces filtres, je propose de :

- Accroître leur complexité ainsi que leur performance en ajoutant de nouvelles propriétés au simple changement de couleur.
- Conserver la simplicité d'utilisation afin de faciliter leur intégration par le public.

Dans ce mémoire, je présente donc plusieurs designs qui sont le fruit d'un long processus de réflexion.

Il sera ainsi question, tout d'abord, de présenter des filtres simples ayant différents types de variation de couleur, par exemple du rouge au jaune ou ce que l'on appelle un changement de couleur inverse, c'est-à-dire du bleu au rouge. Dans le but d'accroître la complexité, des propriétés supplémentaires seront ensuite ajoutées, par exemple, l'agencement de deux filtres superposés permettant d'obtenir trois variations de couleur différentes.

Plusieurs types de dispositifs basés sur le phénomène de métamérisme seront présentés. Les filtres possédant cette caractéristique ont des spectres en transmission et en réflexion différents, mais présentent tout de même la même couleur sous un angle et sous un éclairage spécifique. Ceci permet d'obtenir une image cachée qui n'apparaît que lorsque l'angle d'incidence est modifié. De plus, il est possible d'ajouter une caractéristique spectrale spéciale, telle une grande différence en transmission à une longueur d'onde bien déterminée. Ceci permet une vérification de deuxième ordre, par exemple à travers l'utilisation d'un laser. Une analyse colorimétrique montre également comment ce type de dispositif peut être grandement affecté par des erreurs de déposition et par des changements de source d'illumination.

Le désir de pallier aux problèmes de sensibilité aux erreurs de déposition et aux sources

d'illumination du modèle précédent a mené au concept innovateur suivant. Dans ce cas-ci, les filtres conçus sont métamériques en transmission avec un polymère coloré. De plus, leur spectre en transmission étant très similaire à celui de leur polymère respectif, ils sont métamériques sous presque tous les types d'éclairage standard. Puisque le polymère ne change pas de couleur en fonction de l'angle d'observation, le phénomène d'image cachée est toujours possible.

Finalement, d'autres filtres basés sur l'ajout d'une couche métallique de quelques nanomètres seront présentés. Cet ajout permet la création d'un phénomène visuel impressionnant, soit une couleur différente en réflexion dépendamment du côté selon lequel on les observe, mais une couleur en transmission, qui elle, est indépendante du côté d'observation.

Tous ces designs ont été conçus à l'aide d'un logiciel de conception de filtres interférentiels. Ils ont été déposés à l'aide d'un système de pulvérisation à double faisceaux d'ions, sélectionné pour sa stabilité et la qualité de ses dépôts. Les matériaux diélectriques utilisés sont le SiO_2 et le Ta_2O_5 , tandis que le tantale a été employé comme couche métallique, tous ayant été caractérisés par ellipsométrie. Une fois déposés, les filtres ont été analysés par spectrophotométrie sous plusieurs angles afin d'obtenir leur variation de couleur en réflexion et en transmission.

Afin d'accroître l'aspect esthétique et fonctionnel de ces filtres, différentes techniques ont été utilisées : entre autres, le masquage lors de la déposition, la gravure par laser, la photolithographie, le dépôt sur une couche de faible adhérence et le découpage. Toutes ces méthodes possèdent leurs forces et faiblesses, mais la photolithographie fut sans contredit la technique offrant les meilleurs résultats

À travers tous ces résultats, il est démontré qu'il est encore possible d'innover dans le domaine des filtres interférentiels utilisés à des fins de sécurité. Les dispositifs proposés sont tous simples d'utilisation et offrent des effets optiques clairement identifiables. De plus, leur complexité plus grande au niveau de la fabrication fait en sorte qu'ils seront plus difficiles à contrefaire.

ABSTRACT

Since many years, counterfeiting has been a growing problem affecting our society and its effect is constantly intensifying. A multitude of devices have been developed in order to counter this growing problem. Therefore, the current trend is to constantly make such devices more complicated by using the latest technologies (that are often expensive), in order to discourage counterfeiters.

The use of optical interference filters (interference security image structures - ISIS) as an optical security device has gained in popularity due to its color shifting characteristics as a function of the observation angle. This color change, which is termed iridescence, is not reproducible by reprographic techniques such as photocopying, printing, photography, etc. In order to increase the security offered by such filters, the present work proposes to :

- Increase their complexity as well as performance by adding new properties to the simple color shift.
- Preserve their simplicity of use in order to facilitate their identification by the general public.

In this master's thesis, I present a multitude of designs which are the result of a long reflection process. First, simple filters showing different color shifts, such as a red to yellow or a reverse color shift from blue to red, are presented. In order to increase there complexity, additional properties are added. For example, the combination of two filters in order to obtain three different color shifts.

Many devices based on the metamerism phenomenon will also be presented. Filters possessing this characteristic have different transmission and reflection spectra, and yet they present the same color under a specific angle and illumination source. This makes it possible to create a hidden image effect, that appears only when the device is tilted. It is also possible to add a specific spectral property such as a large difference in transmission at a specific wavelength. This offers a second level of verification for example, by the use of a laser. A colorimetric analysis shows that such devices are highly affected by deposition errors and changes in illumination.

The previous model was then improved by using the following innovative concept. In this case, the filters are metamerism in transmission with a coloured polymer. Their spectra being very similar, they can be made to be metamerism under many standard light sources. Since the polymer doesn't change color as a function of the observation angle, the hidden image effect is still possible.

Finally other filters based on the addition of a thin metallic layer of a few nanometers are shown. This addition permits an impressive visual phenomenon which offers two different colors in reflection depending on the side from which the device is observed and a color in transmission which is independent on the observation side.

All these filters were developed by the use of an interference filter design program. They were deposited by dual ion beam sputtering (DIBS), a very stable system offering a high quality of the deposited materials - we used SiO_2 and Ta_2O_5 as dielectric materials and tantalum as the metallic layer. The optical properties of the film materials and of the filters were evaluated by variable angle spectroscopic ellipsometry and spectrophotometry; the latter measurements performed at different angles were used to determine colors of the filters in transmission and reflection.

To increase their aesthetic appearance, different patterning techniques were used. More precisely : masking during deposition, laser ablation, photolithography, deposition on a low adherence polymer and finally simple cutting. All these methods have their strengths and weaknesses, but photolithography was by far the technique offering the best results.

All of these results demonstrate that it is still possible to innovate in the domain of interference filters applied to security. The proposed devices are simple to use and offer a clearly identifiable optical effect. Furthermore, their increased fabrication complexity ensures that they will be harder to reproduce.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xvi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 LES FILTRES INTERFÉRENTIELS ET LA SÉCURITÉ	2
1.2 OBJECTIFS	2
1.3 PLAN DU MÉMOIRE	3
CHAPITRE 2 THÉORIE	4
2.1 COLORIMÉTRIE	4
2.1.1 INTRODUCTION	4
2.1.2 LA COULEUR	4
2.1.2.1 LES SOURCES D'ILLUMINATION	5
2.1.2.2 L'OEIL	8
2.1.2.3 LES PROPRIÉTÉS DE L'OBJET	11
2.1.3 LES ESPACES DE COULEUR	12
2.1.3.1 L'OBSERVATEUR STANDARD	13
2.1.3.2 L'ESPACE CIE XYZ	15
2.1.4 LE MÉTAMÉRISME	22
2.1.4.1 LA QUANTIFICATION	23
2.2 LA CONTREFAÇON	26
2.2.1 LA MONNAIE	28
2.3 LES FILTRES OPTIQUES	34

2.3.1	INTRODUCTION	34
2.3.2	LES RELATIONS DE DISPERSION	35
2.3.3	LES MATÉRIAUX OPTIQUES	38
2.3.4	L'INTERACTION ENTRE LA LUMIÈRE ET LA MATIÈRE . . .	39
2.3.5	L'OPTIQUE DES COUCHES MINCES	40
2.3.5.1	L'APPROCHE MATRICIELLE	44
2.3.6	LES SYSTÈMES OPTIQUES	45
2.3.6.1	LES FILTRES QUART D'ONDE	45
2.3.6.2	FABRY-PÉROT	47
2.3.6.3	APPLICATIONS POUR LA SÉCURITÉ	48
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE	50
3.1	LA PULVÉRISATION PAR DOUBLE FAISCEAUX D'IONS	50
3.1.1	LA PULVÉRISATION	50
3.1.2	L'ASSISTANCE PAR FAISCEAU D'IONS	51
3.1.3	CRÉATION DU FAISCEAU D'IONS	55
3.1.4	FONCTIONNEMENT DU DIBS	57
3.2	CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX	59
3.2.1	TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION OPTIQUE	59
3.2.1.1	ELLIPSOMÉTRIE SPECTROSCOPIQUE À ANGLE VA- RIABLE	59
3.2.1.2	SPECTROPHOTOMÉTRIE	60
3.2.2	TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION MÉCANIQUE	60
3.2.2.1	MESURES DE STRESS	60
3.2.2.2	MESURES DU MODULE D'YOUNG ET DE LA DURETÉ	61
3.3	CRÉATION DE MOTIFS	61
3.3.1	LASER FEMTOSECONDE	61
3.3.2	PHOTOLITHOGRAPHIE	61
CHAPITRE 4	RÉSULTATS	63
4.1	MATÉRIAUX	63
4.1.1	COUCHES DIÉLECTRIQUES	63
4.1.1.1	PROPRIÉTÉS OPTIQUES	63
4.1.1.2	PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES	65
4.1.2	COUCHE MÉTALLIQUE	65

4.2	DESIGNS	67
4.2.1	VARIATION DE COULEUR SIMPLE - DESIGN A	69
4.2.2	TRIPLE CHANGEMENTS DE COULEUR - DESIGN B	71
4.2.3	CHANGEMENT DE COULEUR INVERSÉ - DESIGN C	74
4.2.4	FILTRES MÉTAMÉRIQUES - DESIGN D	76
4.2.4.1	ANALYSE COLORIMÉTRIQUE	78
4.2.5	FILTRES MÉTAMÉRIQUES-POLYMÈRES	85
4.2.5.1	DESIGN E	85
4.2.5.2	DESIGN F	90
4.2.6	FILTRES MÉTAL-DIÉLECTRIQUE	93
4.2.6.1	DESIGN G	93
4.2.7	DESIGN H	93
4.3	CRÉATION DE MOTIFS	96
4.3.1	INTRODUCTION	96
4.3.2	MASQUAGE	96
4.3.3	LASER FEMTOSECONDE	97
4.3.4	PHOTOLITHOGRAPHIE	98
4.3.5	DÉPOSITION SUR POLYMÈRE AVEC COUCHE DE FAIBLE ADHÉ- SION	98
4.3.6	DÉCOUPAGE	99
CHAPITRE 5	CONCLUSION	101
5.1	SOMMAIRE	101
5.2	PERSPECTIVES	103
	BIBLIOGRAPHIE	105
ANNEXE A	CIEDE2000	111
ANNEXE B	DESIGNS DES FILTRES A À H	113
ANNEXE C	CARTE DE L'INDICE DE MÉTAMÉRISME CIEDE2000 POUR LES DESIGNS D ET E	118

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Spectre du visible et les couleurs associées.	5
Tableau 2.2	Quelques exemples d'illuminants de la CIE.	6
Tableau 2.3	Coordonnées xy et température corrélée de quelques sources et illuminants.	19
Tableau 2.4	Modèles additif et soustractif.	22
Tableau 2.5	Définition des épaisseurs quart d'onde et demi-onde.	46
Tableau 3.1	Paramètres de déposition.	58
Tableau 4.1	Modèle utilisé afin de trouver la courbe de dispersion des matériaux diélectriques utilisés.	63
Tableau 4.2	Paramètres de Cauchy du SiO_2 et du Ta_2O_5	64
Tableau 4.3	Indice de réfraction à 550 nm du SiO_2 et du Ta_2O_5	64
Tableau 4.4	Propriétés mécaniques du SiO_2 et du Ta_2O_5	65
Tableau 4.5	Modèle utilisé afin de trouver la courbe de dispersion du tantale . .	65
Tableau 4.6	Tableau résumé des designs A à H	68
Tableau 4.7	Calculs de différence de couleur pour les filtres A et B du design D .	80
Tableau 4.8	Calculs de différence de couleur pour le filtre E.	87
Tableau 4.9	Calculs de différence de couleur pour le filtre F.	91
Tableau B.1	Design du filtre A.	113
Tableau B.2	Design du filtre B.	114
Tableau B.3	Design du filtre C.	114
Tableau B.4	Design du filtre D - Partie A.	115
Tableau B.5	Design du filtre D - Partie B.	115
Tableau B.6	Design du filtre E.	116
Tableau B.7	Design du filtre F.	116
Tableau B.8	Design du filtre G.	117
Tableau B.9	Design du filtre H.	117

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Graphique de la puissance relative de trois illuminants CIE populaires.	7
Figure 2.2	Schéma de l'oeil humain.	9
Figure 2.3	Densité des cônes et des bâtonnets sur la rétine.	10
Figure 2.4	Courbes de sensibilités des cônes pour un observateur idéal et réel.	11
Figure 2.5	Les fonctions colorimétriques avant et après leur transformation (observateur standard).	15
Figure 2.6	Locus spectral de la CIE.	17
Figure 2.7	L'espace xyY .	17
Figure 2.8	Évolution de la couleur d'un corps noir en fonction de sa température.	18
Figure 2.9	Espace RGB et $CMYK$ représentés sur le locus spectral.	21
Figure 2.10	Cercle de Goethe.	21
Figure 2.11	La série l'Épopée canadienne de la Banque du Canada et ses dispositifs de sécurité	30
Figure 2.12	Permittivité complexe en fonction de la longueur d'onde.	37
Figure 2.13	Réflexion et transmission à une interface.	40
Figure 2.14	Réflectance en fonction de la polarisation et de l'angle d'incidence.	42
Figure 2.15	Réflexions multiples dans le cas d'une couche mince.	43
Figure 2.16	Filtre quart d'onde à 460 nm	47
Figure 3.1	Modèle de structure de zone pour la pulvérisation RF	52
Figure 3.2	Rapport ion/atome en fonction de l'énergie du faisceau d'assistance	53
Figure 3.3	Énergie et rapport des flux d'ions afin d'obtenir des propriétés optiques optimisées pour plusieurs techniques de déposition.	54
Figure 3.4	Schéma de la source d'ions RF	56
Figure 3.5	Schéma du DIBS.	57
Figure 4.1	Valeurs de n et k en fonction de la longueur d'onde pour le tantale.	66
Figure 4.2	Transmission en fonction de la longueur d'onde à incidence normale pour le design A.	70
Figure 4.3	Variation de la couleur en transmission et en réflexion pour le filtre A.	70
Figure 4.4	Transmission en fonction de la longueur d'onde à incidence normale pour le filtre passe-haut du design B.	72
Figure 4.5	Transmission en fonction de la longueur d'onde incidence normale pour le design B.	72

Figure 4.6	Variation de la couleur en transmission et en réflexion pour le design B.	73
Figure 4.7	Transmission en fonction de la longueur d'onde à incidence normale pour le design C.	75
Figure 4.8	Variation de la couleur en transmission et en réflexion pour le design C.	75
Figure 4.9	Transmission en fonction de la longueur d'onde à incidence normale pour le design D - filtre A.	77
Figure 4.10	Transmission en fonction de la longueur d'onde à incidence normale pour le design D - filtre B.	77
Figure 4.11	Variation de la couleur en transmission pour les filtres A et B du design D.	78
Figure 4.12	Comparaison des deux spectres en transmission des filtres métamériques A et B à incidence normale.	79
Figure 4.13	Variation de la couleur (<i>CIELAB</i>) en fonction de l'erreur sur l'épaisseur des couches pour le filtre D - Partie A.	82
Figure 4.14	Variation de la couleur (<i>CIELAB</i>) en fonction de l'erreur sur l'épaisseur des couches pour le filtre D - Partie B.	83
Figure 4.15	Variation de la couleur (<i>CIELAB</i>) en fonction de l'erreur sur l'épaisseur des couches pour le filtre D - Partie A et partie B.	84
Figure 4.16	Transmission en fonction de la longueur d'onde pour le filtre E. . . .	86
Figure 4.17	Variation de la couleur (<i>CIELAB</i>) en fonction de l'erreur sur l'épaisseur des couches pour le design E.	88
Figure 4.18	Photo prise du design E et de deux morceaux de Kapton®.	89
Figure 4.19	Transmission en fonction de la longueur d'onde pour le filtre F. . . .	91
Figure 4.20	Variation de la couleur en transmission pour le filtre F.	92
Figure 4.21	Transmission et réflexion des deux côtés en fonction de la longueur d'onde pour le filtre G.	94
Figure 4.22	Variation de la couleur en transmission et en réflexion pour les côtés A et B du filtre G.	95
Figure 4.23	Photo du design G.	95
Figure 4.24	Photo du design H déposé sur la partie centrale d'un disque compact.	95
Figure 4.25	Image de la gravure d'un filtre interférentiel par laser femtoseconde.	97
Figure 4.26	Création de motifs par photolithographie.	98
Figure 4.27	Carte avec filtre utilisé en réflexion.	99
Figure 4.28	Carte avec filtre utilisé en transmission.	100

Figure C.1	Variation de la couleur (<i>CIE2000</i>) en fonction de l'erreur sur l'épaisseur des couches pour le filtre D - Partie A.	118
Figure C.2	Variation de la couleur (<i>CIE2000</i>) en fonction de l'erreur sur l'épaisseur des couches pour le filtre D - Partie B.	119
Figure C.3	Variation de la couleur (<i>CIE2000</i>) en fonction de l'erreur sur l'épaisseur des couches pour le design F.	119

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A	Illuminant de la CIE
A_p	Aire projetée
A, B, C	Coefficients de Cauchy
A_i, B_i, C_i, D_i, E_i	Paramètres ajustables des relations de Sellmeier
B_Q	Proportion du vecteur de couleur primaire $\vec{B}$
$\vec{B}$	Vecteur de couleur primaire
B	Illuminant de la CIE
BASCAP	Business Action to Stop Counterfeiting and Piracy
BdC	Banque du Canada
c	Vitesse de la lumière dans un matériau
c_0	Vitesse de la lumière dans le vide
C_{ab}^*	Coordonnées colorimétriques (espace LCH)
C	Illuminant de la CIE
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
<i>CIE94</i>	Équation de différence de couleur CIE94
<i>CIEDE2000</i>	Équation de différence de couleur CIEDE2000
<i>CIELAB</i>	Équation de différence de couleur CIELAB
<i>CMYK</i>	Espace colorimétrique (Cyan Magenta Yellow Black)
D65	Illuminant de la CIE
d	Épaisseur d'une couche
dB	Décibel
DIBS	Dual Ion Beam Sputtering
DOVID	Diffraction Optically Variable Image Device
E	Champ électrique
E_i	Énergie des ions incidents
E_p	Énergie des particules qui se déposent
FX	Illuminant de la CIE - X de 1 à 12
G_Q	Proportion du vecteur de couleur primaire $\vec{G}$
$\vec{G}$	Vecteur de couleur primaire
h_{ab}	Coordonnée colorimétrique (espace LCH)
h	Constante de Planck
H	Champ magnétique

H	Couche quart d'onde d'indice de réfraction élevé
I	Intensité de la lumière
IBAD	Ion Beam Assisted Deposition
ISIS	Interference Security Image Structure
k	Coefficient d'extinction
k_B	Constante de Boltzmann
K	Kelvin
l	Profondeur de dommage
L	Couche quart d'onde d'indice de réfraction bas
$L^*a^*b^*$	Espace colorimétrique
m_A	Masse moléculaire
M_I	Indice de métamérisme (I indique l'illuminant)
M_{Lab}	Indice de métamérisme dans l'espace $L^*a^*b^*$
m	Nombre entier
MSE	Mean Square Error
n	Indice de réfraction
N	Indice de réfraction complexe
N_A	Constante d'Avogadro
N_m	Nombre de molécules par unité de volume
OVD	Optically Variable Device
OVI	Optically Variable Ink
p	Polarisation perpendiculaire au plan d'incidence
P	Compacité
P_{max}	Charge maximale
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
$\vec{Q}$	Vecteur couleur
$\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$	Fonctions colorimétriques
r_s, r_p	Coefficients de Fresnel en réflexion
r_D	Vitesse de dépôt
rgb	Espace colorimétrique
RGB	Espace colorimétrique (Red Green Blue)
R	Pourcentage de réflexion
$\vec{R}$	Vecteur de couleur primaire
RF	Radio fréquentielle

R_{total}	Réflexion totale
R_s, R_p	Réfectance
R_Q	Proportion du vecteur de couleur primaire $\vec{R}$
RFID	Radio Frequency IDentification
s	Polarisation parallèle au plan d'incidence
S	Puissance relative d'un illuminant
t_s, t_p	Coefficients de Fresnel en transmission
T	Température
T_{total}	Transmission totale
T_s, T_p	Transmittance
T_m	Température de fusion
U	Énergie radiante
V	Potentiel électrique
V_s	Potentiel du porte substrat
VASE	Variable Angle Spectroscopic Ellipsometry
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	Fonctions colorimétriques transformées
$X_n Y_n Z_n$	Coordonnées XYZ d'un illuminant
xyz	Valeurs tristimuli
XYZ	Espace colorimétrique
ZOD	Zero Order Device
α	Absorptivité
α	Polarisabilité
α_U	Coefficient sans dimension de la relation d'Urbach
β	Coefficient de la relation d'Urbach
γ	Longueur d'onde de coupure (Relation d'Urbach)
δ	Changement de phase
Δ	Différence de phase entre la polarisation s et p
ΔE_{ab}^*	Indice de métamérisme dans l'espace $L^*a^*b^*$
ΔE_I	Indice de métamérisme (I indique l'illuminant)
ϵ	Émissivité
ϵ	Permittivité complexe
ϵ_0	Permittivité du vide
ϵ_x	Déformation relative en x
η	Admittance

θ	Angle de Brewster
λ	Longueur d'onde
μ_0	Perméabilité du vide
ρ	Densité
σ_x	Contrainte en x
ϕ	Angle d'incidence d'un faisceau lumineux
Φ_i	Flux des ions qui bombardent
Φ_n	Flux des particules qui se déposent
Ψ	Différence d'amplitude entre la polarisation s et p

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

La grande majorité de la population ne connaît pas ce que sont des filtres interférentiels, malgré le fait que ceux-ci soient partout autour de nous et qu'ils jouent un rôle primordial dans le monde technologique où nous vivons. Il existe en fait une panoplie d'applications possibles pour ces filtres interférentiels, dont, pour ne mentionner que les principales : filtrage de signaux en télécommunications et en astronomie, filtre antireflet pour des lentilles de caméra et de multiples appareils de mesure, contrôle énergétique pour les vitraux architecturaux, sécurité des documents, etc. Cette dernière application est évidemment le thème de ce mémoire.

Les circonstances selon lesquelles j'ai été introduit au domaine sont multiples, mais voici le cheminement qui mena à ce mémoire. Tout d'abord, ayant fait un projet sur les propriétés optiques des couches minces dans le cadre d'un cours de physique expérimentale, j'avais approché mon futur directeur, Ludvik Martinu, pour un projet de recherche qui se déroulerait durant l'été. Lui ayant fait part de mon intérêt pour les arts, il me proposa d'étudier le domaine de la colorimétrie et d'appliquer celui-ci à l'étude de la couleur des couches minces. Ce projet m'attira grandement, puisque je le jugeais être un agréable mélange de sciences et d'arts.

Deux années plus tard, je revenais parmi le même groupe pour un autre projet d'été. M. Martinu me proposa alors l'étude des filtres interférentiels appliqués à la contrefaçon, domaine ayant un lien direct avec mon premier projet et qui nécessiterait toutes les connaissances que j'y avais acquises. Je dois ajouter, que tout ceci se passe à l'époque de la chute économique du secteur des télécommunications, l'un des principaux utilisateurs de filtres interférentiels. La naissance de mon projet se comprend alors très bien, puisque la nécessité d'élargir les champs d'application du groupe suite à cette chute était d'une grande importance. Ce projet d'été fût très plaisant, ainsi qu'intéressant, et je décidais alors de le prolonger dans le cadre d'une maîtrise. Voilà, en ces quelques lignes, les circonstances qui menèrent à mon introduction à l'étude des filtres interférentiels à des fins de sécurité.

1.1 LES FILTRES INTERFÉRENTIELS ET LA SÉCURITÉ

Définissons maintenant ce qu'est un filtre interférentiel. Il s'agit d'un empilement de plusieurs couches de différents matériaux dont les épaisseurs sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière que l'on désire utiliser. On qualifie ces couches de *minces*, d'où le nom donné au domaine plus général des couches minces. Puisque ces filtres sont généralement utilisés pour des longueurs d'onde allant de l'infrarouge, au visible, à l'ultraviolet et même aux rayons X, les épaisseurs de ces couches peuvent aller de quelques micromètres à seulement quelques angstroms. Ces faibles épaisseurs permettent l'apparition de phénomènes d'interférence, ce qui engendre l'amplification ou l'atténuation en réflexion (ou en transmission) de certaines longueurs d'onde particulières, d'où l'appellation filtre interférentiel.

Mais pourquoi appliquer ces filtres au domaine de la sécurité? Puisque l'épaisseur des couches joue un rôle primordial dans la réponse d'un filtre à la lumière incidente, on peut s'imaginer qu'un changement d'angle d'observation engendrera inévitablement un changement de cette dite réponse. Par conséquent, il est possible d'obtenir un changement de couleur en fonction de l'angle d'observation. Cette propriété est la clé de l'utilisation des filtres interférentiels en sécurité [1].

La matière qui nous entoure est généralement optiquement inerte, on parle alors de non-iridescence. En 1989, afin de protéger les documents importants tels les billets de banque, la Banque du Canada (BdC) introduisit sur sa monnaie un dispositif interférentiel [1, 2]. Ce dispositif fut développé au Conseil national de recherches du Canada sous la direction du Dr. J.A. Dobrowolski ; l'objectif principal étant de contrer d'éventuels problèmes de contrefaçon dus à l'apparition d'imprimantes couleurs. Ce type de contrefaçon est actuellement le plus gros problème auquel font face les banques du monde. Lors d'une conférence à laquelle j'assistais à San Jose en janvier 2006, Sarah E. Church, conseillère scientifique de la BdC, annonça lors de sa présentation que le Canada a un « horrible » problème de contrefaçon. On comprend donc la nécessité de poursuivre la recherche au niveau des dispositifs de sécurité et, dans mon cas, des filtres interférentiels.

Tout ceci sera vu plus en détails au chapitre suivant.

1.2 OBJECTIFS

L'objectif principal de ce projet consiste en la création d'un dispositif de sécurité innovateur à base de couches minces interférentielles. Afin d'accomplir cet objectif, il a été

nécessaire de fixer des objectifs plus spécifiques dont voici les principaux :

- Étudier les dispositifs actuels.
- Une fois ces dispositifs bien compris, augmenter leur complexité en leur ajoutant de nouvelles propriétés : Par exemple, des images cachées par l'utilisation du métamérisme, l'utilisation de couche métallique mince, introduction d'une caractéristique spectrale spécifique, etc. Malgré une augmentation de complexité au niveau de leur fabrication, les dispositifs doivent rester simple d'utilisation pour le public général afin de permettre une identification plus efficace.
- Également, évaluer leur potentiel de fabrication à grande échelle en étudiant leur sensibilité aux erreurs de déposition.
- Finalement, fabriquer ces filtres et vérifier leur performance optique.

1.3 PLAN DU MÉMOIRE

Suite à cette introduction, je présenterai, au chapitre 2, la théorie nécessaire pour une bonne compréhension et interprétation des résultats. Je décrirai ainsi le domaine de la colorimétrie, suivi par un bref aperçu du domaine de la contrefaçon ainsi que de la théorie de base des filtres interférentiels.

Le système expérimental de fabrication ainsi que les diverses techniques de caractérisations optique et mécanique seront présentées au chapitre 3.

Les résultats ainsi que leur discussion sont présentés au chapitre 4. Ces résultats comprennent huit designs différents ayant chacun leurs propriétés particulières. L'ordre selon lequel ces filtres sont décrits est important puisqu'il tient compte de leur évolution en complexité. J'y présente aussi les différentes méthodes utilisées afin d'accroître l'aspect esthétique de ces filtres ainsi que leur application à de potentiels documents.

Finalement, le dernier chapitre 5 consiste en un résumé des principaux résultats obtenus ainsi que des avenues éventuelles qui pourront être envisagées dans le cadre de futurs travaux.

CHAPITRE 2

THÉORIE

2.1 COLORIMÉTRIE

« Colors are the smiles of Nature. »

Leigh Hunt

2.1.1 INTRODUCTION

Nous percevons une énorme quantité de couleur. En fait, il serait impossible de toutes les nommer. Voici l'une des raisons pour laquelle la couleur fût quantifiée et que le domaine de la colorimétrie a été développé à la fin du XIX^e siècle. Comme toutes les sciences, cette dernière est en constante évolution. Il est également intéressant de noter que dans le contexte de la sécurité des documents, la couleur fût introduite suite à l'apparition de la photographie noir et blanc.

On ne peut concevoir des dispositifs de sécurité optiques basés sur un changement de couleur sans avoir une base en colorimétrie. Le chapitre suivant vise donc à instaurer les fondements de cette science. Sont donc présentés les facteurs qui influencent l'apparence des objets qui nous entourent, le fonctionnement de nos yeux, les espaces de couleur ainsi que la notion du phénomène de métamérisme qui nécessite des calculs de différence de couleur. Le lecteur voulant aller chercher plus de renseignements sur la colorimétrie peut consulter le livre de Günter Wyszecki [3] ou le livre de David L. MacAdam, moins exhaustif, mais plus agréable à lire [4]. Finalement, je propose l'excellent livre de Kurt Nassau [5], pour quiconque cherche à comprendre la physique derrière la couleur.

2.1.2 LA COULEUR

Avant de rentrer dans le vif du sujet, il est tout d'abord important de définir le spectre électromagnétique que l'on nomme le *spectre du visible*. Celui-ci s'étend de 380 nm à 780 nm, soit les longueurs d'onde auxquelles nos yeux sont sensibles, cette région se situant entre l'ultraviolet et l'infrarouge. Le tableau 2.1 présente la distribution des longueurs d'onde à travers le spectre du visible et la sensation colorée qu'elles produisent.

Tableau 2.1: Spectre du visible et les couleurs associées.

Longueur d'onde (nm)	Couleur (teinte)
380-400	Violet
400-410	Indigo
410-440	Bleu
440-485	Bleu vert
485-495	Vert bleu
495-535	Vert bleuâtre
535-555	Vert
555-565	Vert jaunâtre
565-575	Jaune verdâtre
575-580	Jaune
580-585	Orange
585-600	Orange rougeâtre
600-780	Rouge

Trois facteurs influencent la couleur des objets qui nous entourent : l'éclairage, le détecteur, dans notre cas l'oeil humain, et finalement l'objet lui-même. Nous verrons plus en détail chacun de ces facteurs dans les sections qui suivent.

2.1.2.1 LES SOURCES D'ILLUMINATION

Dépendamment de l'éclairage que nous utilisons, les objets nous apparaissent différents. Il nous est tous arrivé de s'apercevoir une fois rendu au travail, que l'un de nos bas est bleu et l'autre noir. La différence nous paraît si évidente, mais pourtant, à la maison, les deux bas étaient pratiquement identiques. Ce phénomène s'explique bien si on analyse le type d'éclairage qui est commun dans le domicile des gens et celui dans les lieux publics. En effet, on utilise habituellement des lampes incandescentes dans le premier et des tubes fluorescents dans le second. Puisque les lampes incandescentes ont très peu d'intensité dans la partie bleue du spectre, ce qui n'est pas le cas des tubes fluorescents, on peut percevoir que très peu de différence entre un bas bleu foncé et un bas noir. Il est à noter que la source lumineuse la plus importante est évidemment le soleil, fournissant un éclairage direct, mais également diffus à cause de l'atmosphère.

Tableau 2.2: Quelques exemples d'illuminants de la CIE.

Illuminants	Description
A	Lampe incandescente
B	Lumière du jour directe
C	Lumière du jour (ciel obscurci) - (obtenue par l'utilisation de filtres à partir de l'illuminant A)
D65	Lumière du jour - ciel nord américain (l'intensité dans les courtes longueurs d'onde est plus élevée qu'à l'équateur et plus basse aux longues longueurs d'onde)
FX (X allant de 1 à 12)	Différents types de fluorescents

Par contre, ajoutons, qu'un phénomène que l'on appelle la *constance de la couleur* joue un rôle important dans notre perception des objets qui nous entourent. En effet, des objets familiers semblent préserver leur couleur peu importe le type d'éclairage. Par exemple, une tomate est rouge sous l'éclairage du soleil et le restera toujours à nos yeux, même sous une autre source d'illumination. Cet effet découle directement du traitement fait par notre cerveau (psychophysique de la vision).

Étant donné l'importance que l'éclairage joue dans la mise en application d'un modèle colorimétrique, la Commission Internationale sur l'Éclairage (CIE) a créé des standards que l'on nomme illuminants. Il en existe deux types, ceux qui sont basés sur des sources réelles et qui sont utilisables en laboratoire (ce qui est le cas des illuminants A et C) et ceux qui sont le résultat de mesures statistiques (par exemple l'illuminant D65). Quelques illuminants importants sont présentés dans le tableau 2.2.

La distribution en puissance relative de ces illuminants (normalisée de façon à ce que la puissance soit de 100 à 560 nm) en fonction de la longueur d'onde est fournie par la CIE. Ajoutons que la différence entre l'illuminant C et D65 se situe surtout dans la région des ultraviolets. Cette distribution pour trois illuminants populaires est présentée à la figure 2.1.

On remarque la très grande différence entre l'illuminant A et les deux autres. En fait, lorsque l'on désire avoir une bonne idée de la couleur qu'aura un objet sous un éclairage naturel (à l'extérieur), un éclairage aux fluorescents peut offrir une bonne approximation. Dans le cas de l'illuminant A, on note que la courbe est très similaire à celle d'un corps

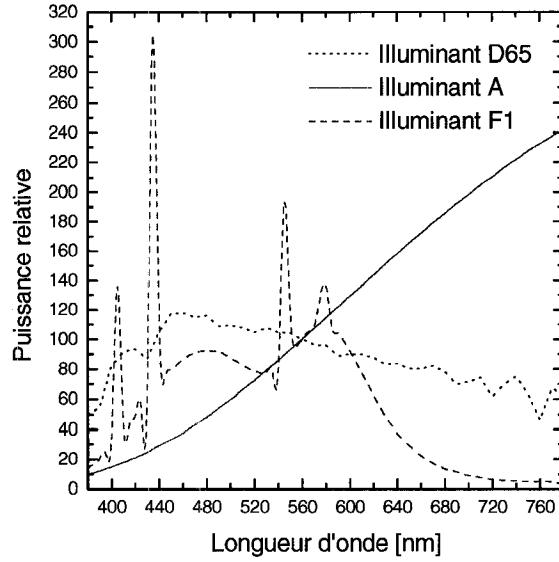


Figure 2.1: Graphique de la puissance relative de trois illuminants CIE populaires.

noir, puisqu'il s'agit d'un filament de tungstène d'une ampoule de 500W chauffant à une température de 2856 K. L'évolution de la longueur d'onde maximale d'émission (λ) pour un corps noir est donnée par la loi de Wien :

$$\lambda_{max} = \frac{hc_0}{4.965k_B T} = \frac{2898}{T} [\mu\text{m}] \quad (2.1)$$

où h est la constante de Planck, c_0 la vitesse de la lumière dans le vide, k_B la constante de Boltzmann et T la température en Kelvin. Cette dernière équation est obtenue à partir de l'équation de Planck :

$$U(\text{énergie radiante}) = \frac{8\pi hc}{(\lambda)^5 (e^{(hc/k\lambda T)} - 1)} [\text{J/m}^4] \quad (2.2)$$

Si l'on fait le calcul à une température de 2856 K, on obtient une longueur d'onde de 1015 nm, ce qui explique la position du maximum de la courbe affichée sur la figure 2.1. Dans le cas d'une source de ce type, on parle d'un éclairage chaud. D'ailleurs ce type de lampe produit beaucoup de chaleur puisqu'elles émettent en grande partie dans l'infrarouge. Ceci se traduit par des pertes en énergie lumineuse et donc une faible efficacité. L'éclairage avec une lampe incandescente donne ainsi une apparence plutôt jaunâtre aux objets.

Il est donc possible d'associer une température aux couleurs émises par les différents types d'illuminant (ceci est possible grâce au métamérisme, que nous expliquerons à la

section 2.1.4). Pour la lumière du jour, on parle d'une couleur de température corrélée d'environ 5000 K, ce qui correspond à une longueur d'onde de 580 nm, soit au centre du spectre du visible. La couleur perçue est plutôt blanchâtre avec une légère dominance de bleu.

Il existe d'autres types d'éclairage, qui, étant donné leur distribution spectrale limitée, confèrent une apparence très dénaturée aux objets. Quelques exemples sont les lampes au mercure (gaz ionisé : longueurs d'onde émises 254, 313, 365, 405, 436, 546 et 578 nm), les lampes au sodium, les laser, les lampes halogènes, etc. L'ajout de phosphore sur les parois d'une lampe au mercure est à la base des tubes fluorescents qui sont de quatre à six fois plus efficaces en intensité dans le visible qu'une lampe incandescente. L'illuminant F1 présenté à la figure 2.1, affiche les pics du mercure superposés à un spectre continu dû au revêtement fluorescent. J'ai personnellement été confronté à des problèmes d'éclairage, puisque l'un de mes espaces de travail est éclairé avec des lampes au sodium. Par conséquent, les couleurs de mes filtres étaient toujours complètement différentes de ce à quoi je m'attendais.

2.1.2.2 L'OEIL

Un autre facteur qui influence la perception des couleurs est l'observateur. L'oeil humain est une structure très complexe dont le développement au cours de l'évolution n'est d'ailleurs pas encore tout à fait compris. Ce fût en fait l'une des « bêtes noires » de Darwin (1809-1882) tel qu'il en témoigne dans son livre « L'origine des espèces ». Par contre, son fonctionnement est relativement bien compris, et celui-ci se fait en trois étapes : la réception du signal, le traitement et l'interprétation. Nous allons surtout nous concentrer sur la réception et le traitement du signal, puisque l'interprétation relève du cerveau et peut rapidement devenir très compliquée pour les besoins de la cause.

Ce détecteur est différent chez chacun d'entre nous, mais généralement très similaire. Néanmoins, il arrive que certaines personnes aient des déficiences au niveau de leur vision. Par exemple, le daltonisme, qui correspond à des problèmes au niveau de la perception des couleurs, affecte 8% des hommes et 0,5% des femmes. La vieillesse cause également le jaunissement du cristallin et mène jusqu'aux cataractes. Il est important de savoir que les conditions sous lesquelles on observe un objet influencent également la couleur perçue, c'est-à-dire que l'oeil est affecté par les conditions ambiantes présentes mais également antérieures. En voici quelques exemples :

- Les objets autour réfléchissent la lumière : l'objet que nous observons peut être influencé par nos vêtements par exemple.

- La couleur de l'arrière plan : un objet placé sur un fond clair paraîtra plus foncé qu'il ne l'est vraiment et inversement pour un fond foncé (phénomène psychophysique : contraste simultané).
- L'oeil se fatigue après de longues expositions.
- Il peut y avoir saturation des cellules de la rétine. Par exemple, lorsque l'on rentre dans un endroit très sombre après avoir été à l'extérieur au gros soleil.

Tout ceci nous indique qu'il est très important de toujours être conscient de l'environnement et des conditions de l'observateur lors d'évaluations colorimétriques afin de s'assurer de la reproductibilité des résultats. Ceci dit, on comprend pourquoi l'élaboration d'un modèle colorimétrique indépendant de tous ces facteurs est importante.

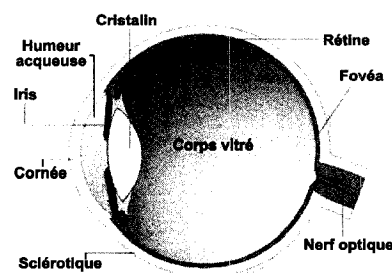


Figure 2.2: Schéma de l'œil humain. Tirée de : <http://www.zeiss.fr>.

Observons maintenant la structure de l'œil (voir figure 2.2). Ayant la forme d'une sphère d'environ 12 mm de rayon, il est composé d'une multitude de composantes, chacune jouant un rôle important dans notre capacité à observer et à s'adapter à notre environnement. Il y a d'abord la cornée, qui est en quelque sorte la porte d'entrée de la lumière. Vient ensuite l'iris, jouant le rôle de diaphragme qui contrôle la quantité de lumière

pénétrant dans l'œil. Il est suivi par le cristallin, qui sert de lentille et projette ainsi la lumière sur notre rétine, d'une superficie de 11 cm^2 , d'une épaisseur de $250 \mu\text{m}$ et contenant environ 200 millions de cellules nerveuses qui sont sensibles à la lumière. La rétine possède une zone de sensibilité maximale à la couleur que l'on nomme la fovéa (contenue dans la macula, qui est la zone où les cônes sont en plus grande densité - $5,2$ degrés d'angle de vision). Elle possède également une zone insensible appelée la tache aveugle, qui est en fait la région de connexion entre la rétine et le nerf optique. Toutes ces composantes baignent dans l'un des deux milieux suivants qui contrôlent la pression interne afin de maintenir la structure de l'œil : l'humour aqueux ou vitreux.

La détection de la lumière dans la rétine se fait par deux types de cellule : les bâtonnets et les cônes (nommés ainsi à cause de leur forme). Les bâtonnets sont responsables de la vision scotopique et, étant donné leur grande taille, offrent une résolution relativement faible. Ils sont tout de même très sensibles aux faibles intensités de lumière (un seul photon peut être détecté). Lorsque la lumière ambiante est trop élevée, les bâtonnets cessent d'envoyer des

signaux. Ceux-ci sont surtout présents à l'extérieur de la macula, la zone sur laquelle est projetée l'image lorsque l'on fixe un objet. Ceci explique pourquoi les étoiles nous paraissent plus claires lorsque l'on ne les fixe pas (voir figure 2.3). Puisque ce chapitre porte sur la vision des couleurs, nous nous concentrerons désormais sur les cônes. La vision diurne est

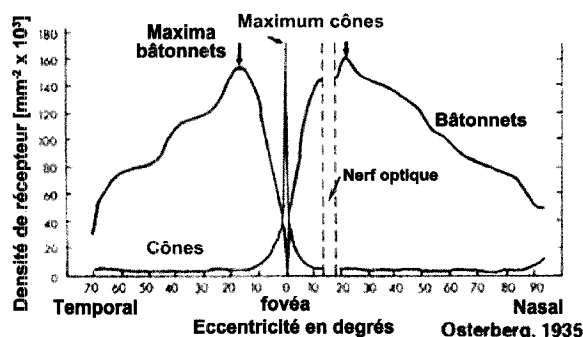


Figure 2.3: Densité des cônes et des bâtonnets sur la rétine. Tirée de : <http://webvision.med.utah.edu/>

quant à elle assurée par les cônes. Il en existe trois types, chacun particulièrement sensible à une région spécifique du spectre du visible, plus précisément, les régions du bleu, du vert et du rouge. On les appelle ainsi les cônes bleus ou courts (courtes longueurs d'onde), les cônes verts ou moyens et les cônes rouges ou longs. Les courbes de sensibilité pour ces trois cônes sont présentées à la figure 2.4. Il est important de noter que les courbes de sensibilités s'entrecroisent, ce qui nous permet de distinguer plus de trois teintes.

Il est également important de noter que les cônes sont beaucoup moins sensibles à la lumière, sont plus petits que les bâtonnets et offrent ainsi une résolution supérieure. Lorsque la lumière est absorbée par les cônes, ceux-ci, comme un détecteur, intègrent sur toute leur plage de sensibilité l'énergie incidente. Ces trois signaux ont mené à la théorie de la trichromie. Cette théorie est à la base du concept du métamérisme, c'est-à-dire que plusieurs spectres peuvent stimuler la même couleur. Ceci permet à l'industrie de l'automobile, par exemple, d'agencer différents matériaux. Ce phénomène rend également possible l'existence d'appareils tels la télévision couleur, les imprimantes, les caméras, etc.

C'est donc l'interaction entre les signaux des trois cônes qui nous permet d'observer le monde en couleur. De nos jours, les scientifiques s'entendent sur le concept qu'il existe trois types d'interaction que l'on nomme les canaux opposés. L'addition des cônes rouges et verts est le canal responsable de la luminance (noir et blanc), le canal vert-rouge correspond à la

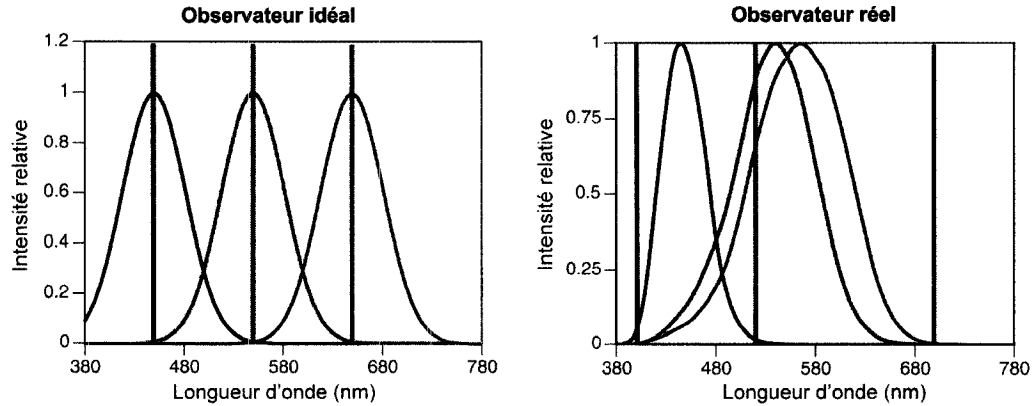


Figure 2.4: Courbes de sensibilités des cônes pour un observateur idéal et réel. Tirée de [6].

soustraction du signal vert au signal rouge et finalement le canal bleu-jaune à l'addition des signaux rouge et vert soustrait du signal bleu. L'idée de ce modèle d'opposition provient du fait qu'il est difficile de s'imaginer un vert rougeâtre ou un bleu jaunâtre (couleurs opposées). Il est, par contre, possible de s'imaginer un vert jaunâtre.

Il est important de noter, tel que dit précédemment, qu'il existe une grande variation dans le système visuel de la population humaine. Il faut ainsi être conscient que tout système développé est basé sur des études statistiques.

Finalement, il est important de connaître la courbe de sensibilité de l'oeil en fonction de la longueur d'onde. Nous savons déjà que la zone de sensibilité se situe de 380 nm à 780 nm. Plus spécifiquement, elle est pratiquement nulle à 380 nm pour augmenter et atteindre sa valeur maximale à 555 nm. Elle diminue ensuite jusqu'à zéro à 780 nm. La courbe obtenue ressemble grandement à une gaussienne (voir figure 2.4).

2.1.2.3 LES PROPRIÉTÉS DE L'OBJET

Finalement, le dernier élément qui influence la couleur d'un objet est évidemment l'objet lui-même. Tout dépend de ses propriétés optiques, soit la réflexion, la transmission dans le cas d'objets transparents, l'absorption et la diffusion (due à la présence de petites particules dont l'indice de réfraction est différent du milieu ambiant, responsables de l'apparence blanchâtre de la neige, de la fumée, du lait, etc.). Si un objet est transparent et diffusif, on parle alors de translucidité. Les propriétés de surface sont également importantes, menant soit à la réflexion spéculaire (surface lisse : lustre) ou diffuse (surface rugueuse). De plus, certains

matériaux émettent de la lumière lorsqu'ils sont éclairés, ce sont les matériaux fluorescents (ultraviolet et courtes longueurs d'onde réémis à des longueurs d'onde plus grandes) et phosphorescents.

La lumière incidente sur les objets opaques qui nous entourent peut être affectée de trois façons. Elle peut subir deux types de réflexion en surface : diffuse ou spéculaire (surtout pour des angles rasants) et laisser la composition spectrale de la lumière incidente pratiquement inchangée. Par contre, la majorité de la lumière pénètre dans l'objet et subit une absorption sélective (transformée en chaleur) tandis que le reste est retourné de façon diffuse (dû à une structure microscopique irrégulière). Les trois types d'interaction avec l'objet sont donc la réflexion, l'absorption et la diffusion. Dans le cas des objets transparents, on doit ajouter une composante de lumière transmise.

Ceci dit, dans notre cas, ce sont surtout la réflexion et transmission qui nous intéresseront dans le cas des filtres complètement diélectriques et également l'absorption dans le cas des filtres métal/diélectrique. Ajoutons que la réflexion est à toute fin pratique spéculaire dans le cas des filtres interférentiels. En effet, la réflexion diffuse que présentent les objets qui nous entourent fait en sorte qu'ils sont optiquement invariables, c'est-à-dire que leur couleur est indépendante de l'angle sous lequel on les observe. Dans le cas des filtres optiques, la réflexion étant spéculaire, leur couleur dépendra de l'angle d'observation (iridescence, conséquence d'une microstructure ordonnée).

2.1.3 LES ESPACES DE COULEUR

Nous avons vu que notre système visuel fonctionne grâce à l'existence de trois signaux différents. Il est donc intéressant de constater que toute couleur peut être exprimée par trois composantes :

- **Teinte** : La teinte est une couleur spécifique (rouge, bleu, vert, jaune, etc.). On estime que l'oeil humain peut distinguer environ 200 teintes.
- **Saturation** : La saturation est un indicateur de la concentration de teinte. Une couleur 100% saturée est dite pure et est généralement générée par une source monochromatique (exemple : laser HeNe). Le rouge et le rose sont un bon exemple de variation de saturation. En effet, une baisse en saturation pâlit la couleur, ce qui correspond à élargir la largeur spectrale d'une source monochromatique. On parle ainsi souvent du « pourcentage de blanc ».
- **Luminosité** : Lorsque la luminosité est maximale, la couleur devient blanche. Au contraire, lorsqu'elle diminue, la couleur tend vers le noir. Plus le pourcentage de

lumière réfléchi par un objet est élevé, plus il sera lumineux. On parle souvent de « pourcentage de noir » dans le cas de la luminosité.

Nous allons maintenant montrer comment la CIE a réussi à créer un espace de couleur. Tout est basé sur la comparaison de deux stimuli. Newton fut le premier à faire ce type d'expérience au début des années 1700. Il avait remarqué qu'il arrivait à reproduire de la lumière blanche en combinant un faisceau bleu avec un faisceau jaune (métamérisme). On peut donc s'imaginer un appareil permettant de recréer n'importe quelle couleur par le maniement des intensités de différents faisceaux (colorimètre). Par contre, nous savons déjà qu'il n'existe pas de métamérisme parfait puisque personne ne voit le monde exactement de la même façon. Il était ainsi nécessaire de définir un observateur standard qui limiterait cet effet de divergence. C'est ce qu'a fait la CIE en 1931.

2.1.3.1 L'OBSERVATEUR STANDARD

Imaginons que nous sommes en présence d'un observateur idéal ayant les courbes de sensibilité présentées dans la partie gauche de la figure 2.4. La réponse de ces cônes à un stimulus est facilement calculable. Il s'agit de faire le produit de la sensibilité des cônes par la puissance spectrale relative de la source d'illumination et de sommer chacun des produits. Ceci dit, si on observe un objet, il faut ajouter le pourcentage de la lumière que celui-ci réfléchit, ce qui se traduit par une multiplication supplémentaire.

Utilisons maintenant un colorimètre constitué de trois sources monochromatiques (450 nm, 550 nm, 650 nm), les couleurs primaires. On définit les couleurs primaires tel que :

- Chacune d'elles ne peut être obtenue par la somme des deux autres ou de toutes autres couleurs.
- Il est possible d'obtenir toutes les teintes de couleurs par le mélange des trois primaires.

On s'aperçoit qu'à chacune de ces longueurs d'onde, il est possible d'exciter chacun des cônes individuellement en allumant seulement une des sources monochromatiques. L'addition des trois sources permet ensuite de recréer toutes les couleurs du spectre selon les *lois de Grassmann* [6], qui disent essentiellement que la couleur peut être traitée algébriquement.

Pour un observateur réel, qui est présenté dans la partie droite de la figure 2.4, il est impossible de trouver trois primaires pouvant exciter chaque cône individuellement dû au chevauchement accentué dans la région des bleus. Le meilleur compromis que l'on puisse utiliser est le suivant : 400 nm, 520 nm et 700 nm. C'est cette impossibilité de cibler un seul cône qui explique pourquoi il est impossible de recréer toutes les couleurs du visible avec trois primaires réelles.

Le montage utilisé par la CIE [7] est donc constitué d'un colorimètre avec deux champs d'observation (2° d'angle de vision, pour que l'image se trouve seulement sur la fovéa). En 1964, la même expérience fut refaite avec 10° d'angle de vision pour accommoder les applications à grande surface. D'un côté, nous avons les trois couleurs primaires. De l'autre côté, il y a également les mêmes trois couleurs primaires et une source supplémentaire. Cette source peut être une lampe quelconque derrière un monochromateur. Il s'agit ainsi de projeter chaque longueur d'onde une à une et de trouver le mélange des trois couleurs primaires qui permet de recréer la couleur monochromatique. Par contre, dans certaines situations, il sera impossible de reproduire une couleur et il faudra alors allumer l'une des primaires et l'ajouter au faisceau monochromatique. On obtient ainsi ce que l'on appelle les fonctions colorimétriques (« color-matching functions »). On remarque que ces courbes ont des valeurs positives et négatives, qui symbolisent l'ajout d'un faisceau primaire du côté de la lumière monochromatique. Les proportions des trois couleurs primaires sont nommées valeurs tristimuli. La couleur obtenue peut donc être représentée par l'équation algébrique suivante :

$$\vec{Q} = R_Q \vec{R} + G_Q \vec{G} + B_Q \vec{B} \quad (2.3)$$

Généralement, afin de faciliter la représentation, on projette le vecteur Q sur le plan où $R + G + B = 1$. Dans cet espace triangulaire (triangle de Maxwell), les coordonnées du point sont données par

$$r = \frac{R_Q}{R_Q + G_Q + B_Q} \quad (2.4)$$

$$g = \frac{G_Q}{R_Q + G_Q + B_Q} \quad (2.5)$$

$$b = \frac{B_Q}{R_Q + G_Q + B_Q} \quad (2.6)$$

de sorte que $r + g + b = 1$. Ceci rend le stimulus indépendant de son intensité.

Dans le cas de la CIE, les couleurs primaires utilisées étaient : 435,8 nm, 546,1 nm et 700 nm. Afin d'assurer la reproductibilité, les deux premiers correspondent à des raies d'émission du mercure et celle de 700 nm n'a que très peu d'influence même si une erreur de longueur d'onde se produisait, puisque le cône rouge n'est pas très sensible à cette longueur d'onde. De plus, les valeurs des différents stimuli utilisés à chaque longueur d'onde étaient d'énergie égale. On obtient dans ce cas-ci les fonctions colorimétriques présentées dans la partie gauche de la figure 2.5.

Pour des fins économiques, puisqu'à l'époque l'informatique n'en était qu'à ses débuts, et afin de faciliter la fabrication de colorimètres, les fonctions colorimétriques ont été modifiées.

Premièrement, la présence de valeurs négatives a été éliminée. Deuxièmement, l'une des trois courbes ($\bar{g}$) a été égalisée à la courbe de sensibilité photopique de l'oeil (indique la sensibilité de l'oeil à différente intensité en fonction de la longueur d'onde). Troisièmement, l'aire sous la courbe des trois primaires a été égalisée. Les trois primaires obtenues sont notées : $\bar{x}$, $\bar{y}$ et $\bar{z}$ (la barre indique que ces valeurs sont le résultat d'une étude statistique et donc qu'elles sont des moyennes). On parle souvent de primaires imaginaires, puisque leurs coordonnées xyz ne sont pas comprises à l'intérieur de l'espace des couleurs réelles. Nous verrons cet espace sous peu. Ces résultats ont mené à la création d'un *observateur standard* présenté dans la partie de droite de la figure 2.5.

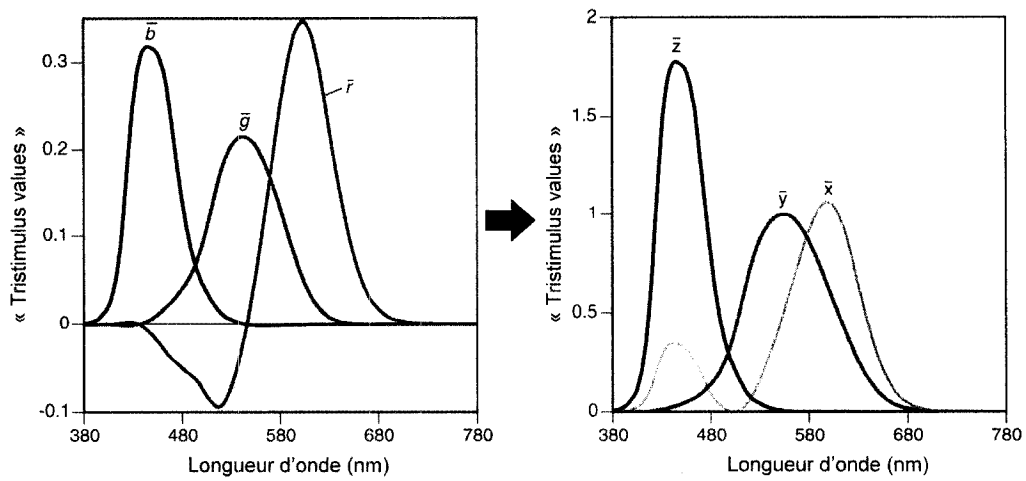


Figure 2.5: Les fonctions colorimétriques avant et après leur transformation (observateur standard). Tirée de [6].

2.1.3.2 L'ESPACE CIE XYZ

Armée des résultats précédents, la CIE a pu définir l'espace de couleur XYZ . La façon de calculer ces coordonnées (valeurs tristimuli) pour un objet en réflexion est simple :

$$X = j \sum_{\lambda=380\text{nm}}^{\lambda=780\text{nm}} S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} \Delta\lambda \quad (2.7)$$

$$Y = j \sum_{\lambda=380\text{nm}}^{\lambda=780\text{nm}} S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta\lambda \quad (2.8)$$

$$Z = j \sum_{\lambda=380\text{nm}}^{\lambda=780\text{nm}} S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} \Delta\lambda \quad (2.9)$$

avec

$$j = 100 / \sum_{\lambda=380\text{nm}}^{\lambda=780\text{nm}} S_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta\lambda \quad (2.10)$$

Ici S représente la puissance relative de l'illuminant sous lequel est placé l'objet que l'on observe et R est le pourcentage de lumière réfléchi. Il est à noter que l'on peut remplacer R par T si l'objet est transparent. Y représente la luminance et dans le cas d'un objet qui réfléchirait 100% de la lumière à toutes les longueurs d'onde, on obtiendrait une valeur pour Y de 100.

Nous obtenons ensuite les coordonnées de chromaticité x , y et z :

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (2.11)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2.12)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (2.13)$$

De cette façon, la somme de x , y , et z est de 1. Ceci permet de faire une projection bi-dimensionnelle sans perte d'information de la troisième dimension, ce qui ne serait pas le cas si on utilisait X , Y et Z . Les coordonnées de chromaticité sont alors données par les trois valeurs suivantes : (x , y et Y).

Si l'on suppose un objet ayant 100% de réflexion à une seule longueur d'onde et que l'on fait le calcul pour une source blanche (émettant uniformément sur tout le visible), on trouve une valeur bien particulière. En fait, si on fait le même calcul pour toutes les longueurs d'onde, et que l'on trace les coordonnées x et y ($Y = 0$) obtenues, on obtient ce que l'on appelle le locus spectral. Cet espace délimite la zone où toutes les couleurs possibles peuvent exister. La ligne droite joignant les deux terminaisons de la courbe se nomme la ligne des pourpres (voir figure 2.6). Le coin inférieur droit représente la longueur d'onde de 780 nm, la pointe supérieure 520 nm et la pointe inférieure gauche 380 nm.

Si l'on place une couleur sur ce graphique et les coordonnées de l'illuminant utilisé (on retrouve ses coordonnées en utilisant un objet parfaitement réfléchissant sur tout le spectre) et que l'on relie les deux, le point d'intersection de la droite et du locus (du côté le plus prêt de l'objet) correspond à la longueur d'onde dominante. L'autre intersection correspond à la longueur d'onde complémentaire (l'addition des longueurs d'onde dominante et complémentaire donne du blanc).

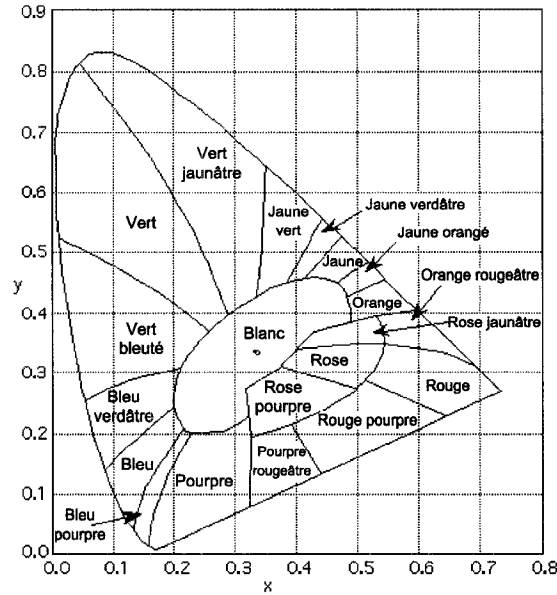


Figure 2.6: Locus spectral de la CIE - 2 degrés - 1931. Tirée du logiciel *TFCalc*.

La troisième dimension est celle de la luminosité Y . Par contre, plus Y augmente, plus l'espace dans lequel peuvent se trouver les coordonnées de couleur rétrécit. Ceci se comprend bien si on considère que plus une couleur est lumineuse, moins elle pourra être saturée, puisqu'elle sera de plus en plus blanchâtre. En fait, le niveau où Y est nul correspondrait à une couleur noire sur tout le locus spectral! Le blanc le plus pur est un point à Y égale à 100 et x et y égaux à 0,33.

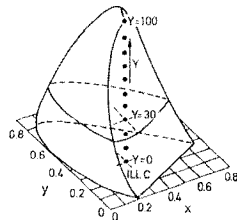


Figure 2.7: L'espace xyY . Tirée de [8].

Maintenant que nous connaissons l'espace xyY , il est intéressant d'observer la variation de couleur d'un corps noir en fonction de sa température et comment les illuminants de la CIE peuvent y être rattachés. Nous avons vu précédemment la loi de Wien, qui permet d'obtenir la position du maximum d'intensité de la courbe d'émission d'un corps noir. La figure 2.8 présente donc la variation en couleur d'un corps noir en fonction de sa température.

Un solide incandescent (tungstène par exemple) émet toujours moins qu'un corps noir à la même température. On parle alors d'un corps gris. Le ratio entre l'émission de l'objet en question et celle d'un corps noir s'appelle l'émissivité $\epsilon(\lambda)$ et elle dépend de la longueur

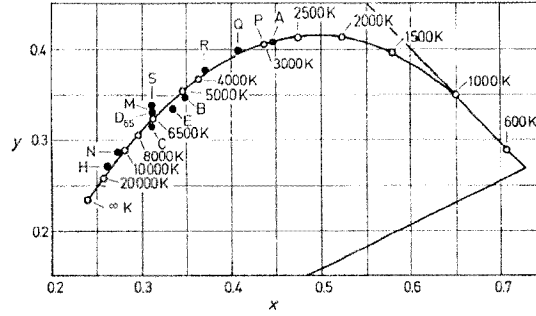


Figure 2.8: Évolution de la couleur d'un corps noir en fonction de sa température en Kelvin (K). On y voit également les illuminants A, B, C et D65 ; source d'égale énergie (E) ; fluorescent standard : « warm white » (P), « white » (Q), « cool white » (R), « daylight » (S) ; ciel nuageux (M) ; lumière d'un ciel nordique sous un angle de 45° (N) ; ciel bleu et sans nuage (H). Tirée de [8].

d'onde. En effet, supposons un corps gris qui réfléchit 10% de la lumière incidente à 500 nm. Dans ce cas-là, s'il s'agit d'un objet opaque, 90% de la lumière sera absorbée (absorptivité : α). Ce 90% correspondrait également à l'émissivité de ce corps gris. On peut donc poser que $\epsilon = \alpha$. Un corps noir a donc un $\epsilon = 1$ pour toutes les longueurs d'onde et un diffuseur parfait un $\epsilon = 0$ ($\epsilon = \alpha = 1 - R$), avec R le pourcentage de réflexion.

Il est possible de définir une courbe pour les illuminants D (« daylight locus »). L'équation paramétrique de cette courbe est donnée par [9] :

$$y = -3,000x^2 + 2,870x - 0,275 \quad (2.14)$$

Cette courbe est légèrement plus haute que la courbe de Planck et la suit parallèlement. La température corrélée obtenue dépend de la couverture nuageuse, de la position de la Terre par rapport au soleil ainsi que de l'inclinaison du soleil dans le ciel, de la température ambiante, etc. Le tableau 2.3 ajoute plus de détails sur les illuminants et différentes sources d'illumination.

L'espace que nous venons de voir est évidemment très non-linéaire, c'est-à-dire que la distance entre deux couleurs n'est pas très représentative de ce que nous observons comme variation. On a qu'à regarder la zone des verts et celle des bleus.

Depuis 1931 et jusqu'à aujourd'hui, les scientifiques tentent toujours de développer des espaces de plus en plus linéaires. Cette tâche est rendue difficile étant donné les grandes différences chez les observateurs, les multiples facteurs affectant leur jugement et la grande probabilité que l'espace de couleur soit non-euclidien [3]. L'un des ces espaces est le $L^*a^*b^*$

Tableau 2.3: Coordonnées xy et température corrélée de quelques sources et illuminants.

Sources et illuminants	Coordonnées xy		Température corrélée
	x	y	degrés K
Soleil au dessus de l'atmosphère	0,318	0,33	6200
Ciel clair et bleu	0,262	0,270	15000
Ciel partiellement nuageux	0,294	0,309	8000
Ciel nuageux	0,313	0,329	6500
Tungstène	0,477	0,414	2400-2600
Fluorescent Standard Cool white	0,367	0,375	4370
Illuminant A	0,4476	0,4075	2850
Illuminant B	0,3484	0,3516	4874
Illuminant C	0,3101	0,3162	6774
Illuminant D65	0,3127	0,3290	6504
Illuminant F1	0,3131	0,3371	6430
Source d'énergie égale	0,3333	0,3333	5400

(CIELAB). Cet espace est basé sur la théorie des couleurs opposées présentée précédemment. Afin de convertir de l'espace XYZ à $L^*a^*b^*$, il faut utiliser les équations suivantes [6] :

$$L^* = 116 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - \frac{16}{116} \right] \quad (2.15)$$

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \quad (2.16)$$

$$b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \quad (2.17)$$

avec

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} \text{ si } \frac{Y}{Y_n} > 0,008856 \quad (2.18)$$

sinon

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = 7,787 \left(\frac{Y}{Y_n}\right) + \frac{16}{116} \quad (2.19)$$

de même pour

$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) \text{ et } f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)$$

Il existe également une version de l'espace $L^*a^*b^*$ en coordonnées polaires (LCH) :

$$C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (2.20)$$

qui représente la distance par rapport à l'origine (saturation) et

$$h_{ab} = \arctan \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (2.21)$$

qui donne la direction (teinte).

X_n , Y_n et Z_n représentent les coordonnées XYZ de l'illuminant utilisé. On remarque que pour la composante a^* , qui correspond au canal rouge-vert, on soustrait la composante verte (Y) de la composante rouge (X). Pour le canal jaune-bleu (b^*), on soustrait la composante bleue (Z). On comprend donc la forme de ces équations. Les exposants et les constantes ne sont là que pour ajuster le modèle. L'espace $L^*a^*b^*$ étant plus linéaire, il est maintenant possible de faire des calculs de différence de couleur. Nous verrons ces calculs dans la section métamérisme.

Deux autres espaces qui méritent d'être mentionnés sont le **RGB** (**R**ed **G**reen **B**lue), qui est un modèle additif, et le **CMYK** (**C**yan **M**agenta **Y**ellow **B**lack), qui est un modèle soustractif. Le premier est utilisé dans tous nos écrans de télévisions ou d'ordinateurs. Évidemment, il est très utile afin de projeter les couleurs calculées en coordonnées xyY , car s'imaginer la couleur d'un objet ayant les coordonnées (0,4, 0,5, 34,0) n'est pas évident pour tous ! Ceci dit, l'élément le plus important à savoir est que la gamme des couleurs pouvant être obtenues par ces espaces est limitée. En effet, comme l'indique la figure 2.9, les couleurs pouvant être reproduites dans le modèle **RGB** sont comprises à l'intérieur d'un triangle formé par les trois primaires utilisés (phosphores, électrochromes, etc.).

L'espace **CMYK**, quant à lui, est utilisé dans le domaine de l'impression. De plus, la gamme de couleur du **CMYK** n'est pas la même que celle du **RGB**, c'est-à-dire que certaines couleurs pouvant être obtenues en **RGB** ne sont pas possibles en **CMYK**. Ceci explique pourquoi souvent, lorsque l'on imprime une image, on s'exclame : « Ce ne sont pas du tout les mêmes couleurs que j'avais à mon écran ! ». C'est la raison pour laquelle j'utiliserai les espaces xyY et $L^*a^*b^*$ à des fins de calculs de différence de couleur et les espaces **RGB** et **CMYK** afin de faciliter l'interprétation ainsi qu'ajouter à l'aspect esthétique de la présentation des résultats.

La gamme limitée de couleur pouvant être obtenues par les imprimantes sur le marché permet ainsi aux banques d'imprimer des billets avec des encres qui possèdent des coordonnées xyY à l'extérieur de la gamme des couleurs offertes par les imprimantes commerciales.

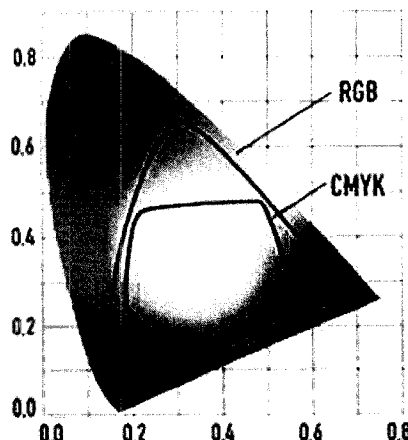


Figure 2.9: Espace *RGB* et *CMYK* représentés sur le locus spectral. Tirée de : <http://www.ekdahl.org>.

Comme il a été mentionné ci-haut, le modèle *RGB* est basé sur la théorie des mélanges additifs et le modèle *CMYK* sur les mélanges soustractifs. On définit un mélange additif comme étant le mélange de lumière provenant de différentes sources avant que celle-ci n'atteigne l'oeil.

Le tableau 2.4 présente les bases du modèle additif. Le modèle soustractif quant à lui, se définit comme étant toute couleur qui peut être obtenue par une seule source de lumière mais dont certaines parties sont soustraites par deux ou plusieurs absorptions successives. Nous sommes habituellement familiers avec ce modèle puisque nous avons tous dessinés lorsque nous étions jeunes et savons ainsi, par exemple, que mélanger du jaune avec du bleu nous donnera du vert. Les couleurs obtenues par soustraction sont généralement plus ternes que les encres pures (non mélangées)

puisqu'elles sont pratiquement toujours contaminées. Par exemple, le mélange d'encres jaune et magenta permet d'obtenir du rouge, mais dont le spectre en réflexion possède toujours un pic de magenta, qui vient neutraliser en partie le rouge obtenu et diminue ainsi sa pureté. Ceci résulte en un rouge plus foncé. Encore une fois, ce modèle est présenté au tableau 2.4.

On doit ajouter que le bleu du modèle *RGB* constituait un compromis du fait que des phosphores effectifs dans le violet n'étaient pas disponibles lorsque la télévision couleur est

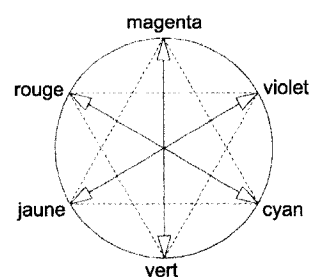


Figure 2.10: Cercle de Goethe. Tirée de [10].

Tableau 2.4: Modèles additif et soustractif.

Modèle additif
Rouge + Vert $\rightarrow$ Jaune
Vert + Bleu $\rightarrow$ Cyan
Bleu + Rouge $\rightarrow$ Magenta
Rouge + Vert + Bleu $\rightarrow$ Blanc
Modèle soustractif
Cyan + Magenta $\rightarrow$ Violet
Magenta + Jaune $\rightarrow$ Rouge
Jaune + Cyan $\rightarrow$ Vert
Cyan + Magenta + Jaune $\rightarrow$ Noir ou gris foncé

apparue [10]. On remarque également que les deux modèles sont complémentaires. Ainsi, l'addition des primaires des deux modèles donnera soit du blanc (additif) ou un gris foncé (soustractif). Une façon sommaire de se représenter ces modèles est le cercle de Goethe (voir figure 2.10).

Un autre type de mélange de couleur est également possible, celui-ci obtenu par moyennage. Il en existe deux types : le moyennage spatial et le moyennage temporel. On obtient un moyennage spatial lorsque des faisceaux de différentes couleurs atteignent la rétine mais sur une surface plus petite que la résolution de notre oeil. Ainsi, on obtient une moyenne du signal incident qui se compare à un mélange additif. C'est le principe derrière les téléviseurs couleurs où trois pixels juxtaposés permettent de recréer une bonne partie du locus. Un autre exemple classique est une page de livre observée de loin qui nous apparaît grise. On obtient un moyennage temporel lorsque les stimuli de différentes couleurs se succèdent au même endroit sur la rétine à un rythme qui est plus rapide que la vitesse d'acquisition et d'interprétation de nos yeux et de notre cerveau. Un exemple classique est un disque noir et blanc en rotation rapide qui devient gris.

2.1.4 LE MÉTAMÉRISME

La notion du métamérisme est essentielle lorsqu'il s'agit de faire concorder les couleurs de différents objets. Voici un exemple afin d'expliquer ce qu'est le métamérisme : supposons qu'un artiste commence une toile. Après plusieurs heures de travail, il s'aperçoit que l'un de

ses tubes de peinture est vide. Il va donc en acheter un autre, mais malheur, celui qu'il utilisait n'est plus disponible. Il achète donc une couleur similaire d'un autre fabricant. Celui-ci continue donc sa toile et réussit à obtenir les mêmes couleurs que précédemment. Comment cela ce fait-il, puisque la nouvelle couleur n'a probablement pas les mêmes propriétés spectrales ?

Le métamérisme se définit donc comme étant le fait que plusieurs spectres peuvent produire la même couleur à nos yeux. Autrement dit, différentes combinaisons d'intensité de signal générées par les trois cônes produisent la même couleur perçue. Par contre, comme il a été dit précédemment, la vision des couleurs dépend non seulement des propriétés optiques des matériaux, mais également de la source d'illumination. Il va de soit que des objets qui sont métamériques sous une lampe incandescente ne le soient pas nécessairement sous la lumière du jour. Ainsi, le métamérisme parfait n'existe pas. Une règle de base stipule qu'il faut généralement au minimum trois intersections entre deux spectres afin que le métamérisme soit possible. Évidemment, plus le nombre d'intersections est grand, plus il y a de chances que les deux spectres soient métamériques sous plusieurs illuminants. Le métamérisme parfait est donc atteint lorsque le nombre d'intersections devient infini, soit deux spectres identiques.

Il est important d'ajouter qu'autant le métamérisme fait la joie des artistes, pour les concepteurs de billets de banque, il est à la base de l'un des problèmes les plus graves que nous avons mentionnés ci-haut, soit la reproduction des documents en utilisant un imprimante maison. Comme quoi le bonheur des uns fait le malheur des autres.

2.1.4.1 LA QUANTIFICATION

Comment fait-on pour quantifier la différence de couleur entre deux objets ? Voilà une question qui, à priori, peut paraître simple, mais qui en réalité est relativement complexe.

La réponse la plus simple est de calculer la distance entre deux points dans l'espace xyY . On obtient ainsi l'équation suivante :

$$\Delta E_I = M_I = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (2.22)$$

où (x_1, y_1, Y_1) et (x_2, y_2, Y_2) sont les coordonnées colorimétriques de deux objets. L'équation 2.22 permet d'obtenir ce que l'on appelle *l'indice de métamérisme*. L'indice I indique l'illuminant sous lequel a été fait le calcul. Plus M est faible, plus les couleurs des deux objets sont similaires.

Puisque l'espace xyY est loin d'être linéaire, utilisons maintenant l'espace $L^*a^*b^*$. Par ailleurs à l'équation 2.22, nous obtenons pour cet espace :

$$\text{CIELAB} = \Delta E_{ab}^* = M_{L^*a^*b^*} = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (2.23)$$

L'espace $L^*a^*b^*$ étant plus linéaire (mais évidemment pas parfait), la distribution des couleurs est plus uniforme et celles-ci peuvent donc être plus efficacement comparées.

La plupart des chercheurs s'entendent sur le fait qu'une valeur de $M \leq 1$ est la limite en dessous de laquelle nos yeux ne sont plus capables de distinguer de différence entre deux couleurs. On appelle cette limite une *différence à peine perceptible* [11]. Mon expérience m'a d'ailleurs permis de confirmer cette valeur. Fait intéressant, nos yeux peuvent détecter un changement de longueur d'onde dominante dans la région du vert entre 2 et 6 nm ! Une industrie développant un produit dont la couleur doit être contrôlée peut ainsi se fixer une valeur de M maximale au-dessus de laquelle un échantillon est rejeté. L'équation 2.23 devient alors l'équivalent d'une sphère à l'intérieur de laquelle tous les échantillons de couleur obtenus doivent se trouver.

Il y a tout de même un problème avec cette dernière équation. En effet, MacAdam a démontré dans les années 1940 [12], lors d'expériences de sensibilité, que pour une couleur donnée, l'espace de différence à peine perceptible forme une ellipse. Ceci dit, notre approximation précédente d'une sphère correspond donc à une lame à double tranchant. Si on se fixe une valeur de M suffisamment élevée afin de contenir toute l'ellipse en question, il y aura alors une grande quantité d'échantillons qui seront considérés comme étant métamériques, mais qui en fait ne le seront pas. On obtient alors une production accrue, mais une baisse de qualité. Le cas opposé, est une sphère qui est de la taille maximale de l'ellipse. Cette fois-ci, nous aurons une baisse du nombre d'échantillons acceptés, mais une augmentation de la qualité. Par contre, plusieurs échantillons métamériques seront perdus (augmentation des coûts). Il est donc désirable d'avoir une équation qui permet de modéliser la forme ellipsoïde de MacAdam. C'est le cas de l'équation CIE94 :

$$\text{CIE94} = \Delta E_{94}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{k_H S_H}\right)^2} \quad (2.24)$$

avec $S_L = 1$, $S_C = 1 + 0,045C_{ab}^*$ et $S_H = 1 + 0,015C_{ab}^*$ et $k_L = k_C = k_H = 1$ dans les conditions de référence (illuminant D65, surface uniforme et homogène, plus de 4° de taille visuel, $\Delta E_{ab}^* \leq 5$, etc). Le C_{ab}^* utilisé correspond à celui du standard. Pour plus de détails sur l'équation 2.24, voir la référence [6]. Les paramètres S permettent de corriger l'uniformité

de l'espace $L^*a^*b^*$ et les k permettent de faire des ajustements pour des conditions hors référence.

Finalement, les derniers développements ont mené à l'équation CIEDE2000, qui améliore les prédictions dans la région des bleus et des couleurs grises, deux des problèmes du modèle précédent. Ce modèle étant plus complexe [13], les équations sont mises en annexe afin d'alléger le texte.

2.2 LA CONTREFAÇON

« There is no security on this earth. Only opportunity. »

Douglas MacArthur

Il n'est pas rare de nos jours de se retrouver face à une petite affiche, dans notre dépanneur du coin, nous indiquant que les billets de 50 et de 100 dollars ne sont plus acceptés. Il est clair que le propriétaire de cet établissement s'est déjà retrouvé avec un faux billet et qu'il ne désire pas risquer se faire prendre une deuxième fois. Ceci dit, il est relativement simple de détecter un faux, mais généralement les gens n'ont pas le temps ou ne sont pas dans un environnement leur permettant de faire une vérification approfondie. Malheureusement, il arrive également souvent que le public général ne soit pas au courant des différents dispositifs de sécurité présents sur la monnaie qu'ils utilisent. Une étude a démontré qu'en moyenne, les gens ne connaissent que 1,7 dispositifs sur un billet de banque [14]. Il est donc important que tout dispositif soit simple, efficace et rapide à utiliser, mais également, que la population soit informée. En effet, l'aspect sécurité des documents est si souvent gardé secret, afin d'empêcher la contrefaçon, que le public en souffre. Il faut dire que ce n'est pas la méthode de fabrication des différents dispositifs qui empêche la contrefaçon, mais plutôt leur complexité et les coûts qui sont reliés à leur fabrication [10]. Effectivement, les appareils servant à leur fabrication sont souvent très dispendieux et difficiles à acquérir. L'expertise nécessaire afin de fabriquer ces dispositifs est également un élément supplémentaire qui doit être obtenu par les contrefaiseurs. On peut faire une comparaison avec le monde informatique de la cryptographie, dans le sens où les algorithmes utilisés sont connus, mais ce sont les clés utilisées qui manquent aux pirates informatiques.

Il ne faut pas se le cacher, la fraude augmente de plus en plus. On évalue à 600 milliards de dollars US, le montant en biens piratés [15]. On note une augmentation significative de faux billets américains, la devise la plus contrefaite, dont certains billets d'une qualité surprenante indiquent l'implication et la collaboration probable de plusieurs groupes du crime organisé. On note également une hausse des pertes en fausses cartes de crédit, de création de fausses identités à des fins de terrorisme, trafic de drogue, immigration, etc. C'est la raison pour laquelle les producteurs de dispositifs de sécurité utilisent toujours la technologie la plus récente, afin de rester un pas en avance des contrefaiseurs. Par contre, pour des raisons politiques, économiques, etc., il faut généralement faire des compromis, et qui dit compromis dit contrefaçon. La protection des documents nécessite donc une bonne compréhension des risques présents et futurs que court le document afin d'assurer un

maximum de sécurité.

Une fois le document émis, la responsabilité d'assurer la bonne circulation de celui-ci incombe aux autorités policières, gouvernementales et agences spécialisées. Il faut donc s'assurer que leurs effectifs ainsi que l'expertise technique à leur disposition sont suffisants afin de faire une inspection adéquate.

Comme il a été mentionné précédemment, il est important de bien cibler les menaces qui peuvent se présenter face au document que l'on veut protéger. L'une des menaces les plus marquantes est l'apparition « récente » des imprimantes haute résolution. En 1995, moins de 1% des billets contrefaits étaient imprimés numériquement comparativement à 40% en 2002 [16]. L'accès à ces imprimantes rend la création de faux billets de banque très attrayante et relativement facile. Malgré la qualité croissante de ces faux billets, ils sont encore facilement reconnaissables lorsque observés attentivement. Par contre, ce n'est pas tout le monde qui a le temps de sortir une loupe et d'observer un billet de banque. De plus, il est pratiquement impossible de retracer les contrefaiseurs puisque ces imprimantes existent en trop grand nombre. Des moyens commencent à être développés afin de pallier à ce problème. En effet, des gens ont récemment découvert un système d'information caché sur les impressions laser provenant des appareils *Xerox* [17].

Une autre menace provient non pas de la création de faux documents, mais plutôt des altérations apportées aux documents. Par exemple, dans le cas des chèques où le montant est modifié. L'imitation de signatures est également un problème courant.

La fraude par carte de crédit connaît une grande expansion. Les organisations du crime organisé sont présentement capables de créer des cartes de crédit de toutes pièces et ce, hologramme inclus. Malheureusement, il est très rare d'apercevoir une personne examiner une carte de crédit lorsque la transaction est acceptée.

La substitution de photographie dans les passeports est chose courante. Les passeports modernes possèdent donc des dispositifs palliant à ce problème.

Ceci dit, les entreprises sont également aux prises avec la contrefaçon, leurs produits étant copiés et vendus à un prix moindre. C'est le cas de l'industrie pharmaceutique par exemple, mais également de tous les produits de luxe : montres, parfums, vêtements, jouets, logiciels, disques compacts, « DVD » et même des pièces de voiture et d'avion. Trois raisons poussent donc ces entreprises à ajouter des dispositifs de sécurité sur leur produit : les dommages portés à l'image de leurs produits, les pertes financières et finalement les possibilités de procès. Il ne faut pas oublier que, malgré qu'ils soient reproduits, les produits contrefaits ne sont généralement pas d'aussi bonne qualité et ne respectent souvent pas les normes de

sécurité. C'est la raison pour laquelle la Chambre de Commerce Internationale a fondé le « Business Action to Stop Counterfeiting and Piracy » (BASCAP)¹.

Puisqu'un dispositif ne protège généralement que contre un nombre limité de types de fraude, les documents possèdent tous plusieurs dispositifs afin de pallier à une panoplie d'attaques. La complexité et le coût de chaque dispositif dépendent du niveau de sécurité que l'on désire obtenir. Ce niveau est déterminé par une analyse des méthodes utilisées afin de falsifier la version courante du document que l'on désire améliorer. Il faut savoir qu'une protection à 100% n'existe pas et que tendre vers ce 100% coûte extrêmement cher.

De plus, la tendance assez récente est de rendre l'image que présentent certains dispositifs de plus en plus complexe afin de rendre leur reproduction de plus en plus difficile. Ceci a des répercussions directes sur la facilité avec laquelle le public peut identifier l'image et, par conséquent, sur l'efficacité du dispositif. Le public n'étant pas capable de se souvenir et d'avoir une idée claire de l'image, de faux billets pourront passer inaperçus malgré le fait que l'image qu'ils contiennent n'est pas exacte. Il s'agit donc de trouver un équilibre et de miser plus sur la complexité technique du dispositif et non pas celle de son image. Par exemple, dans le cas des couches interférentielles, où des réseaux de diffraction où la matière possède une structure organisée à un niveau submicronique.

Puisque la monnaie est le document possédant le plus grand nombre de dispositifs de sécurité et généralement celui sur lequel se trouve toujours les plus récentes innovations, la section suivante portera sur la monnaie et les dispositifs présents afin de la protéger.

2.2.1 LA MONNAIE

Malgré les dires, la monnaie papier n'est pas prête de disparaître. En effet, bien qu'il y ait eu une croissance soutenue des transactions bancaires et sur Internet, la monnaie complètement digitale n'est pas pour demain. Ne serait-ce tout simplement puisque l'argent papier conserve l'anonymat. Ceci dit, celle-ci est constamment prise pour cible par les contrefaiseurs pour des raisons bien évidentes.

Le type d'attaque le plus courant est l'impression digitale. L'avènement des numériseurs et imprimantes haute résolution ainsi que leur accessibilité permet à quiconque les possède d'imprimer un billet de banque convaincant et ceci avec plus ou moins d'effort. Il est donc primordial de développer des dispositifs permettant de protéger contre ce phénomène de plus en plus répandu.

Les dispositifs de sécurité peuvent être classés selon trois niveaux :

¹<http://www.iccwbo.org/home/BASCAP/menu.asp>

- Le premier niveau, qui s’adresse au public général est composé de dispositifs nécessitant uniquement les sens pour les détecter. Des exemples que nous verrons en détail sous peu sont : dispositifs optiques variables (hologrammes, couches iridescentes, etc.), reliefs tangibles (« intaglio »), etc.
- Le deuxième niveau, qui s’adresse à un public plus professionnel, est composé des dispositifs nécessitant l’utilisation d’outils afin de les valider. Des exemples sont : rayons UV pour fibres et encres fluorescentes, infrarouge, lecteurs de bandes magnétiques, etc.
- Le troisième niveau correspond à tous les dispositifs qui ne sont visibles qu’à l’aide d’équipements sophistiqués. Ils s’adressent donc aux banques et aux départements d’analyse légale.

Prenons donc la monnaie de la Banque du Canada (BdC) comme exemple afin d’observer les différents dispositifs qui y sont présents. La figure 2.11 présente tous les dispositifs de premier niveau qui ont été révélés au public ainsi que les dénominations sur lesquelles ils sont présents. En effet, les banques gardent généralement quelques-uns de leurs dispositifs en réserve afin de dérouter les contrefaiseurs lorsqu’elles s’aperçoivent que le nombre de faux billets augmente.

- Commençons donc par la bande holographique. Les hologrammes sont en utilisation depuis fort longtemps. Le changement de couleur qu’ils offrent en fonction de l’angle d’observation (phénomène de diffraction) protège directement contre toute technique de reprographie. La BdC a choisi d’y inclure des images de la feuille d’érable du Canada ainsi que la valeur du billet. Ceci permet d’empêcher le transfert d’une bande d’un billet de valeur inférieure à un billet de valeur plus grande. Cette bande est grandement inspirée de celle qui est présente sur le 200 Couronnes de la Norvège.
- Le portrait en filigrane est l’un des plus vieux dispositifs. C’est en fait une variation de l’épaisseur du papier qui permet de créer une image qui est visible seulement lorsque le billet est éclairé de l’arrière. L’image qui est présente sur les billets de la BdC est identique au portrait sur le billet. Les gens manifestent par contre une certaine réserve lorsqu’il s’agit de lever un billet et de l’observer devant une source de lumière, de peur d’offenser la personne qui a remis le billet.
- Le fil fenêtré est en fait l’équivalent de la vignette à base de couches minces qui changeait de couleur du doré au vert sur la série des « Oiseaux du Canada ». Il a été démontré lors d’expériences que ce dispositif avait un rendement de 97%, le plus haut de tous les tests, lorsqu’il était utilisé à des fins de détection [18]. C’est ce

SÉRIE L'ÉPOPÉE CANADIENNE		5	10	20	50	100	
1	Bande holographique	✓	✓	✓	✓	✓	
2	Portrait en filigrane	✓	✓	✓	✓	✓	
3	Fil fenêtre à couleur changeante	✓	✓	✓	✓	✓	
4	Chiffre en transvision	✓	✓	✓	✓	✓	
5	Feuilles d'érable iridescentes	*	*				5
6	Chiffre caché	*	*				
7	Impression en relief (taille-douce)	✓	✓	✓	✓	✓	6
8	Motifs composés de fines lignes	✓	✓	✓	✓	✓	
9	Micro-impimpression	✓		✓	✓	✓	
10	Fluorescence	✓	✓	✓	✓	✓	
11	Numéro de série	✓	✓	✓	✓	✓	
12	Couleurs	✓	✓	✓	✓	✓	

Figure 2.11: La série l'Épopée canadienne de la Banque du Canada et ses dispositifs de sécurité. Les astérisques indiquent que ces dispositifs ne sont plus présents sur la dernière version du billet. Tirée de : <http://www.bankofcanada.ca>

qui explique l'effervescence des dispositifs affichant une variation optique (Optically Variable Devices - OVD). En effet, 78 autorités utilisent des DOVID (« Diffractive Optically Variable Image Device ») et 120 des OVI (« Optically Variable Ink ») sur leur monnaie [19]. Par contre, dans ce cas-ci, la bande est tissée à même le papier. De plus, on peut y lire le mot « Canada » suivi de la dénomination du billet. Il est aussi important de bien situer le dispositif. Par exemple, la vignette sur les anciens 20 dollars était située dans le coin supérieur gauche puisque les gens en Occident lisent de gauche à droite et du haut vers le bas. C'était donc la première chose qu'ils voyaient. Il faut également que le changement de couleur soit significatif afin d'obtenir un effet convaincant. D'ailleurs, le changement de couleur du vert au noir présent sur la monnaie des États-Unis était jugé trop difficile à percevoir et les nouveaux billets présentent maintenant un changement du bronze au vert. Sans compter que, si le dispositif est trop petit (plus petit que 1 cm^2), le changement de couleur risque de passer inaperçu. Il est aussi important de bien choisir les couleurs entourant le dispositif. Les critères d'acceptation et d'adaptation pour un OVDs sont : acceptation du public, les coûts de production et d'application, la durabilité et la capacité à résister aux contrefaiseurs.

- Les chiffres en transvision sont tout simplement des chiffres dont la moitié est inscrite sur l'envers du billet et l'autre sur le revers. De cette façon l'image complète peut être vu en transmission. Il s'agit de s'assurer qu'elles sont bien alignées.
- L'impression en relief, que l'on appelle communément « intaglio », ajoute l'aspect tactile à la reconnaissance des billets. Il a été démontré dernièrement que cette technique est encore très efficace et appréciée par le public [18]. Puisque l'on parle de l'aspect tactile de l'inspection, le papier sur lequel sont imprimés les billets est aussi très important puisqu'il diffère du papier généralement utilisé par la population. Les billets de la BdC sont composés à 100% de coton. Une tendance assez récente sont les billets en polymère (Australie, Malaisie, etc.). En fait, ce sont 23 pays qui ont adopté la monnaie en polymère. Parmi les avantages relevés : la propreté des billets, sa structure (durée de vie quatre fois plus élevée que la monnaie papier [20]) et l'utilisation de nouveaux dispositifs de sécurité. La Nouvelle-Zélande, qui utilise ce type de monnaie depuis maintenant cinq ans, affirme qu'ils ont obtenu une baisse de 54% de leur coût de publication de billets après quatre années. De plus, en 2004, sur les 66 millions de billets traités par machine, seulement 28 faux billets ont été détectés [21]. Ceci est un bon indicateur que les contrefaiseurs ont de la difficulté avec les billets en polymère.

- Les motifs composés de fines lignes et la micro-impression sont une façon de protéger contre les imprimantes digitales. Par contre, celles-ci étant de plus en plus performantes, il n'est pas toujours évident de détecter un faux. On peut s'attendre que ce type de protection ne soit plus utile d'ici la prochaine génération [22]. Sans compter que le public considère généralement qu'il est trop long d'observer cet aspect du billet.
- Lorsque le billet est observé sous une source ultraviolette, une image rouge et jaune apparaît par fluorescence (encres). Il y a également apparition de fibres rouges et jaunes.
- Finalement, le numéro de série est propre à chaque billet et la couleur du billet aussi. Les couleurs utilisées ne sont généralement pas accessibles avec des imprimantes normales (encres spéciales).

Nous pouvons également ajouter que le portrait est un élément très important. En effet, il est reconnu que chez les humains, les visages sont les images les plus facilement reconnaissables. De cette façon, une légère altération du portrait est généralement perçue. C'est pour cette raison que les portraits occupent maintenant une plus grande surface sur les nouveaux billets.

Il est à noter que les banques sont maintenant obligées de changer leurs billets à toutes les cinq à dix années afin de minimiser la contrefaçon au lieu de 10 à 15 comme elles le faisaient auparavant. Un fait intéressant, plus un billet est esthétiquement beau, plus le public porte attention aux dispositifs du billet.

Quels sont les futurs dispositifs qui seront utilisés ? Seul le temps nous le dira, mais en voici une liste probable :

- Radio Frequency IDentification (RFID) [23, 24] : Cette technologie a été proposée pour la prochaine série de l'Euro (Euro 2), mais a été mise de côté. Elle est, par contre, utilisée dans les passeports de certains pays. La puce doit être très mince, robuste et flexible. Le problème en ce moment en est surtout un de coût. Ce dispositif coûte actuellement trop cher, mais on estime que sa production à grande échelle permettra de diminuer de beaucoup les coûts. L'objectif visé est de 0,02 Euros. Grâce à cette technologie, les agences gouvernementales pourront suivre le cheminement de tous les billets de banque.
- Colour Switch[®] de Hueck Folien.
- Les cristaux liquides cholestériques : STEP[®] and StarChrome[®]
- La combinaison de la diffraction et de l'interférence fait l'objet de plusieurs recherches en ce moment. Un exemple est le Lightgate de Flex Products [25, 26].

- Dispositifs d'ordre zéro en diffraction (Zero Order Devices (ZODs)).
- Bactériorhodopsine qui est une molécule photochromique [27, 28].
- Matériaux thermochromiques [29].
- Les images digitales modulées.
- Etc.

Nous ne passerons pas toutes ces technologies en revue puisqu'il y en a tout simplement trop. Il est par contre intéressant à noter que des matériaux « intelligents » et organiques sont en train de s'introduire dans la conception des dispositifs de sécurité.

2.3 LES FILTRES OPTIQUES

« La lumière ne fait pas de bruit. »

Félix Leclerc

2.3.1 INTRODUCTION

Les phénomènes d'interférence sont partout autour de nous. Que se soit les couleurs changeantes d'une bulle de savon, les plumes d'un paon, une flaque d'essence ou les ailes d'un papillon, la nature abonde d'exemples. Il est relativement simple de les expliquer de nos jours, mais cela ne fut pas toujours le cas. En effet, il a fallu attendre l'arrivée d'un modèle de la lumière suffisamment développé afin que cela soit possible.

À l'époque de Newton au XVIII^{ème} siècle, le modèle corpusculaire de la lumière avait le dessus sur le modèle ondulatoire. Newton ne rejetait pas ce dernier modèle, mais penchait plutôt vers le modèle corpusculaire et, due à son autorité sur ses contemporains, il fallut attendre les travaux de Thomas Young (12 novembre 1801) sur l'interférence pour que le modèle ondulatoire soit de plus en plus accepté. Newton avait pourtant associé une longueur d'onde à chaque couleur qu'il avait observée, mais préférait supposer que chacune d'elle était un corpuscule voyageant à une vitesse différente. Malgré tout, lors de l'expérience des anneaux de Newton (lorsqu'une lentille est déposée sur un autre substrat de verre), il déclara :

« I forbore to treat of these Colors, because they seemed of a more difficult Consideration, and were not necessary for establishing the Properties of Light there discoursed of. »

On reconnaît la sagesse de ce grand homme de science par sa capacité à exprimer son incompréhension. Il faut dire que Young s'est fié sur les travaux de Newton afin d'arriver à son modèle. Fresnel énonce ensuite la nature transverse de la lumière (1816), ainsi que la théorie de la diffraction. C'est également à celui-ci que nous devons les équations permettant de connaître l'amplitude et la phase d'un rayon transmis et réfléchi à une interface. Suivit Maxwell avec le modèle électromagnétique de la lumière (« Electricity and Magnetism » 1873).

D'un point de vue plus pratique, les premiers filtres antireflets ont été créés par Joseph Fraunhofer en 1817. En effet, on s'était aperçu que l'on voyait mieux à travers les lentilles astronomiques lorsque celles-ci étaient exposées à l'air depuis un certain temps. En effet, les lentilles ternies se couvraient d'une couche d'indice différent qui agissait comme un filtre antireflet. Par des procédés chimiques, on arriva à modifier l'indice de réfraction à la surface

de la lentille et à accentuer cet effet. Après la Première Guerre Mondiale et l'avènement des pompes à diffusion permettant d'atteindre un plus grand vide, le domaine des couches minces a pris son essor. Nous verrons dans les sections qui suivent la base de la théorie des filtres optiques.

2.3.2 LES RELATIONS DE DISPERSION

Lorsque l'on est introduit au concept de l'indice de réfraction (n), la majorité du temps, afin de simplifier les choses, une valeur spécifique nous est donnée et cette valeur s'applique dans toutes les conditions, par exemple, 1,5 dans le cas d'un verre. Par contre, cette supposition n'est valable que pour une plage relativement étroite du spectre électromagnétique de la lumière. En effet, l'indice de réfraction qui se définit comme étant le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide (c_0) sur celle dans un matériau (c),

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (2.25)$$

varie en fonction de la longueur d'onde. On appelle cette variation la dispersion. L'autre paramètre important afin de caractériser un matériau est le coefficient d'extinction (k), qui est relié à la capacité du matériau à absorber la lumière incidente. k varie également en fonction de la longueur d'onde.

Afin de pouvoir exprimer l'évolution de ces deux valeurs en fonction de la longueur d'onde, on utilise ce que l'on appelle des relations de dispersion. Ces relations offrent l'avantage de pouvoir simuler ou caractériser des matériaux sur un très grand spectre.

L'une des relations les plus connue est la relation de Sellmeier. Celle-ci découle de l'équation de Lorentz-Lorenz. Dans ce modèle, on suppose tout d'abord que la réponse diélectrique d'un matériau face à un champ électromagnétique est intimement liée à sa microstructure. Ce que nous observons est en fait la moyenne de la réponse individuelle de ces éléments microscopiques. Par l'intermédiaire de la notion du champ local, on démontre, de façon relativement directe, que la polarisabilité d'un matériau, c'est-à-dire la capacité qu'ont les molécules à s'aligner avec un champ électrique extérieur, est directement reliée à son indice de réfraction. La polarisabilité représente ainsi la réponse microscopique tandis que l'indice de réfraction représente la réponse macroscopique. Cette relation est donnée par :

$$\alpha = \frac{3\epsilon_0}{N_m} \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \quad (2.26)$$

avec ϵ_0 la permittivité du vide, N_m le nombre de molécules par unité de volume et α la polarisabilité. De cette relation, on conclut que plus un matériau sera polarisable et ou que sa densité est élevée, plus son indice de réfraction sera élevé.

Cette équation n'est valable que pour un champ statique et pour des molécules isotropes. La relation de Sellmeier utilise l'équation de Lorentz-Lorenz (équation 2.26), mais, cette fois-ci, en supposant que le champ extérieur n'est pas statique, mais plutôt une onde. En résolvant l'équation différentielle du mouvement des électrons soumis au champ électrostatique, on obtient les relations de Sellmeier que l'on retrouve souvent sous la forme paramétrique suivante [30] :

$$n^2 = 1 + \sum_j \frac{A_j}{1 - B_j^2/\lambda^2} \quad (2.27)$$

$$k = \sum_j \frac{C_j}{nD_j\lambda + E_j/\lambda + 1/\lambda^3} \quad (2.28)$$

avec A_j , B_j , C_j , D_j et E_j des paramètres ajustables. La sommation est présente afin de tenir compte de plus d'une fréquence de résonance. Définissons la permittivité complexe ($\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$), qui est directement reliée à l'indice de réfraction par la relation de Maxwell :

$$N = \sqrt{\epsilon} \quad (2.29)$$

N étant l'indice de réfraction complexe :

$$N = n - ik \quad (2.30)$$

Observons l'évolution de la permittivité sur la figure 2.12. On remarque, par exemple dans le visible, que ϵ' augmente avec la fréquence de la lumière incidente (par conséquent l'indice de réfraction). Par contre, rendue à une certaine fréquence, elle se met à diminuer très rapidement. Rendue à cette fréquence, dans le domaine des UV par exemple, les électrons ne sont plus capables d'osciller aussi rapidement que l'onde incidente. Il y a alors apparition d'absorption et donc de dispersion anormale. On dit anormale car l'indice de réfraction diminue dans ces régions pour une fréquence croissante. Nous avons parlé de polarisabilité, mais nous n'avons jusqu'à maintenant jamais décrit le phénomène en question. En fait, tout dépendamment de la fréquence du champ électrostatique auquel est soumis un matériau, sa réponse sera très différente. Il existe en effet plusieurs mécanismes de polarisation. Pour les molécules non polaires, il y a la polarisation électronique (10^{14} Hz et plus), qui est présente pour tous les diélectriques et la polarisation atomique ou ionique (entre 10^{11} et 10^{13} Hz), présente dans les cristaux ioniques. Si la molécule est polaire (possédant un dipôle permanent), il s'ajoute la polarisation dipolaire (entre 10^5 et 10^{10} Hz) qui correspond à l'alignement des molécules contre l'agitation thermique. Dans le cas des diélectriques hétérogènes, il peut également y avoir polarisation interfaciale entre les différentes frontières due à une accumulation de charges.

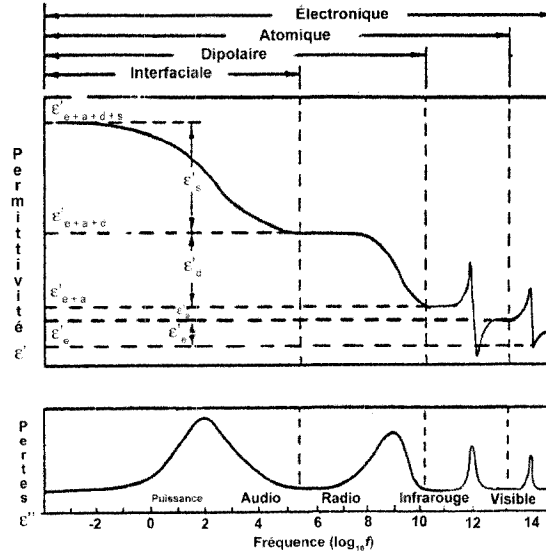


Figure 2.12: Permittivité complexe en fonction de la longueur d'onde. Tirée de [31].

Si on observe l'évolution de la permittivité en fonction de la fréquence présentée à la figure 2.12, on remarque qu'à basse fréquence, les quatre mécanismes de polarisation sont présents. Par contre, ceux-ci perdent en influence un à un à mesure que la fréquence est augmentée. À chaque fois que la limite est atteinte pour l'un des mécanismes, il y a apparition d'une zone de dispersion anormale et donc d'absorption. Notons également que l'indice de réfraction est de plus en plus faible pour des fréquences croissantes puisque la matière interagit de moins en moins avec la lumière incidente.

Une relation qui découle directement des relations de Sellmeier et qui modélise bien la région de dispersion dans le visible et le proche infrarouge pour un diélectrique est la relation de dispersion de Cauchy :

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (2.31)$$

avec A , B et C encore une fois des constantes empiriques et λ en micron. Cette relation sera très utile lors de la modélisation des indices de réfraction des couches diélectriques dans le visible. Lorsqu'il y a présence d'absorption, l'équation d'Urbach sera utilisée :

$$k = \alpha_U e^{\beta \left(1,24 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\gamma}\right)\right)} \quad (2.32)$$

avec α_U un coefficient sans dimension, β en μm^{-1} et γ la longueur d'onde de coupure en μm . Cette expression est valide pour $\lambda > \gamma$.

2.3.3 LES MATÉRIAUX OPTIQUES

Lorsque l'on désire déposer un filtre optique, il est tout d'abord important de connaître les différents matériaux qui s'offrent à nous [32]. En effet, tout dépendamment des caractéristiques que nous recherchons, certains matériaux seront plus utiles que d'autres. Entre autres, les caractéristiques les plus importantes seront l'indice de réfraction, le coefficient d'absorption, et d'autres critères tels la stabilité chimique, la dureté, etc.

Généralement, lorsque l'on traite de l'indice de réfraction d'une couche mince, celui-ci est inférieur à la valeur que l'on obtiendrait pour un matériau à l'état naturel. Ceci s'explique par le fait que la densité des couches est pratiquement toujours plus faible due à la présence de porosités. On définit ainsi la compacité (P) comme étant le rapport entre le volume de solide dans la couche et le volume total de la couche (solide + porosités). Ainsi, pour une couche, on pourra définir son indice de réfraction comme étant :

$$n_{\text{couche}} = n_{\text{en volume}}P + n_{\text{porosité}}(1 - P) \quad (2.33)$$

Avec $n_{\text{en volume}}$ l'indice de réfraction du matériau à l'état naturel et $n_{\text{porosité}}$ l'indice de réfraction des porosités. Ce qui nous permet d'exprimer la compacité comme étant :

$$P = \frac{n_{\text{couche}} - n_{\text{porosité}}}{n_{\text{en volume}} - n_{\text{porosité}}} \quad (2.34)$$

Dans mon cas, étant donné que j'utilise un système de déposition par pulvérisation ayant un bombardement ionique assistant afin d'accroître la compacité de la couche, les valeurs de n_{couche} obtenues sont généralement beaucoup plus proches des valeurs en volume. Ceci est d'une grande importance puisque l'un des grands problèmes des filtres optiques est justement dû à la présence de porosité. En effet, lorsque le filtre est sorti de la chambre de dépôt et exposé à l'air ambiant, il y aura inévitablement infiltration de molécules d'eau à l'intérieur des pores présents dans les couches du filtre. Grâce à l'équation des mélanges que nous venons de voir (équation 2.33), on s'aperçoit aisément que l'indice de chacune des couches sera plus élevé, ce qui déplacera le spectre en transmission et en réflexion. L'une des façons utilisées afin de résoudre ce problème est de prévoir le déplacement du spectre et d'ainsi déplacer le design en conséquence afin qu'une fois exposé, le spectre se retrouve au bon endroit. On peut également tenter d'empêcher l'eau de pénétrer dans le filtre en ajoutant des barrières, couches épaisses diélectriques ou en sandwich entre deux substrats de verre. Les filtres déposés par DIBS ont l'avantage d'être extrêmement stables et donc ne nécessitent pas de protection ou de modification de leur caractéristique spectrale.

Il est important d'ajouter que l'on peut également modifier l'indice de réfraction d'une couche en modifiant la pression de dépôt, la température du substrat lors de la déposition, le taux de dépôt, la pureté du matériau déposé et également la propreté du substrat.

2.3.4 L'INTERACTION ENTRE LA LUMIÈRE ET LA MATIÈRE

Comme nous l'avons vu avec l'équation 2.29, il est possible de relier la permittivité d'un matériau à son indice de réfraction complexe (équation 2.30). Il est possible de définir le coefficient d'absorption à partir du coefficient d'extinction par l'équation suivante :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.35)$$

Ce coefficient permet de déterminer l'intensité de la lumière qui sera transmise à travers une couche d'épaisseur donnée par la relation de Beer-Lambert :

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2.36)$$

Tout dépendant du matériau utilisé, on peut obtenir des pertes en intensité très différentes. Par exemple, dans le cas de la fibre optique, on parle de 1 dB/km, tandis que pour une couche métallique, on parle plutôt de 1 dB/Å, soit 12 ordres de grandeur de différence !

Il existe donc deux grandes classes de matériaux, les diélectriques et les métaux, avec les semiconducteurs entre les deux. Les diélectriques (fluorures, oxydes, chalcogénures, etc.) possèdent un coefficient d'absorption très faible ou pratiquement inexistant dans le visible et l'infrarouge et donc une transmission élevée. L'équation de Lorenz-Lorentz que nous avons vu précédemment permet d'expliquer les propriétés optiques différentes obtenues pour différents diélectriques, par exemple l'augmentation de n de 1,46 pour le verre à 1,55 dans le cas du quartz, due à une augmentation de la densité. Le même phénomène s'observe pour des matériaux à liaison covalente tels le ZnCl_2 ayant un n de 1,68 et le ZnTe avec un n de 3,56 dû à une liaison covalente plus forte.

Les métaux (Al, Rh, Ag, Au, etc.), quand à eux possèdent, un coefficient d'absorption plus élevé ce qui engendre une transmission très faible dépendante de l'épaisseur et une réflexion élevée. Ils sont donc généralement utilisés à des fins de miroir dans le visible (Al et Ag) ou dans l'infrarouge (Au). Ceci dit, dans mon cas, les couches métalliques utilisées sont de très faible épaisseur.

Il existe évidemment des matériaux entre ces deux catégories, on parle des semiconducteurs et des couches transparentes conductrices. Ces dernières sont énormément utilisées dans des applications de décongélation de fenêtres, écrans à cristaux liquides, électrodes pour cellules solaires, revêtements antistatiques, dispositifs électrochromiques, etc.

Finalement, il ne faut pas oublier qu'il existe d'autres facteurs affectant les propriétés optiques des matériaux, entre autres la température (environ une variation de 10^{-5} à 10^{-4} par °C pour l'indice de réfraction), le vieillissement, le stress dans les couches, l'environnement (acide, basique, bactéries, etc.), etc.

2.3.5 L'OPTIQUE DES COUCHES MINCES

Nous allons maintenant passer à travers les bases de l'optique des couches minces. Il nous faut tout d'abord poser quelques suppositions, entre autres, on considère que la lumière qui est incidente sur les couches est une onde plane, monochromatique et harmonique. De plus, les couches sont isotropes, leurs interfaces parallèles et infinies.

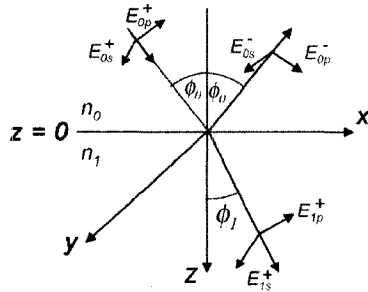


Figure 2.13: Réflexion et transmission à une interface.

Tout d'abord, la lumière possède deux polarisations : *s* et *p*. La première étant parallèle au plan d'incidence et la deuxième perpendiculaire. Les propriétés spectrales dépendent de la polarisation de la lumière incidente (sauf à incidence normale). Par contre, il est nécessaire de savoir que nos yeux font la moyenne de ces deux composantes. Supposons maintenant une interface, c'est-à-dire un changement de milieu en $z = 0$ (voir figure 2.13). On obtient alors les composantes suivantes pour les champs électrique et magnétique

$$E_{0x} = (E_{0p}^+ + E_{0p}^-) \cos \phi_0 \quad (2.37)$$

$$E_{0y} = (E_{0s}^+ + E_{0s}^-) \quad (2.38)$$

$$H_{0x} = n_0 (-E_{0s}^+ + E_{0s}^-) \cos \phi_0 \quad (2.39)$$

$$H_{0y} = n_0 (E_{0p}^+ + E_{0p}^-) \quad (2.40)$$

et pour le milieu 1 :

$$E_{1x} = E_{1p}^+ \cos \phi_1 \quad (2.41)$$

$$E_{1y} = E_{1s}^+ \quad (2.42)$$

$$H_{1x} = -n_1 E_{1s}^+ \cos \phi_1 \quad (2.43)$$

$$H_{1y} = n_1 E_{1p}^+ \quad (2.44)$$

En appliquant les conditions aux frontières (composantes tangentielles de E et H continues aux interfaces), on obtient les coefficients de Fresnel, soit les rapports des amplitudes réfléchies et transmises en fonction de l'angle d'incidence. Pour la polarisation s , on obtient :

$$\frac{E_{0s}^-}{E_{0s}^+} = \frac{n_0 \cos \phi_0 - n_1 \cos \phi_1}{n_0 \cos \phi_0 + n_1 \cos \phi_1} = r_{1s} \quad (2.45)$$

$$\frac{E_{1s}^+}{E_{0s}^+} = \frac{2n_0 \cos \phi_0}{n_0 \cos \phi_0 + n_1 \cos \phi_1} = t_{1s} \quad (2.46)$$

et pour la polarisation p

$$\frac{E_{0p}^-}{E_{0p}^+} = \frac{n_0 \cos \phi_1 - n_1 \cos \phi_0}{n_0 \cos \phi_1 + n_1 \cos \phi_0} = r_{1p} \quad (2.47)$$

$$\frac{E_{1p}^+}{E_{0p}^+} = \frac{2n_0 \cos \phi_0}{n_0 \cos \phi_1 + n_1 \cos \phi_0} = t_{1p} \quad (2.48)$$

Pour obtenir la réflectance et la transmittance (les rapports des énergies), on doit procéder de la manière suivante :

$$R_s = \frac{(E_{0s}^-)^2}{(E_{0s}^+)^2} = r_{1s}^2 \quad (2.49)$$

$$R_p = \frac{(E_{0p}^-)^2}{(E_{0p}^+)^2} = r_{1p}^2 \quad (2.50)$$

$$T_s = \frac{n_1 (E_{1s}^+)^2}{n_0 (E_{0s}^+)^2} = \frac{n_1}{n_0} t_{1s}^2 \quad (2.51)$$

$$T_p = \frac{n_1 (E_{1p}^+)^2}{n_0 (E_{0p}^+)^2} = \frac{n_1}{n_0} t_{1p}^2 \quad (2.52)$$

Il est intéressant de noter que pour la polarisation p , la réflectance tombe à zéro à un angle particulier. On appelle cet angle l'angle de Brewster (voir figure 2.14). Celui-ci est donné par :

$$\theta_{\text{Brewster}} = \arctan \left(\frac{n_1}{n_0} \right) \quad (2.53)$$

La figure 2.14 présente l'évolution de la réflectance en fonction de l'angle d'incidence pour la polarisation s et p et ce, pour des couches d'indices de réfraction différents. À incidence normale, les équations 2.49 à 2.52 se simplifient pour devenir :

$$R_s = R_p = \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2 \quad (2.54)$$

$$T_s = T_p = \frac{4n_0 n_1}{(n_0 + n_1)^2} \quad (2.55)$$

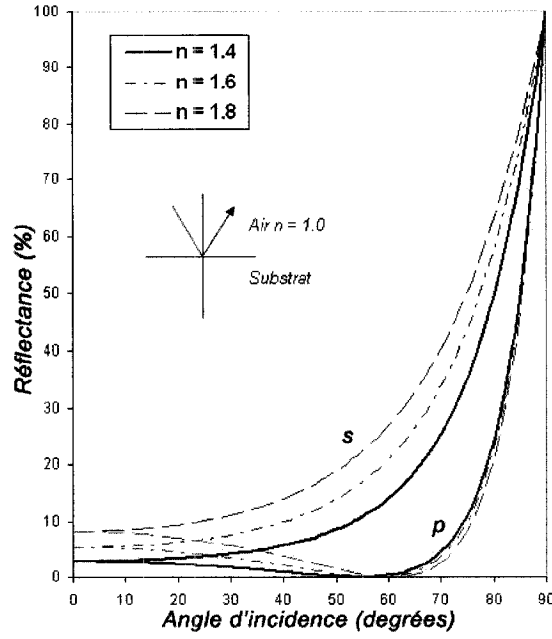


Figure 2.14: Réflectance en fonction de la polarisation et de l'angle d'incidence.

On remarque que ces valeurs sont indépendantes de la polarisation et que lorsqu'il n'y a pas d'absorption, la somme de R et de T nous donne 1, c'est-à-dire que toute l'énergie incidente est soit réfléchie ou transmise. Nous négligerons les pertes par diffusion dans notre développement puisque nos couches sont de bonne qualité.

Pour un milieu absorbant, il s'agit de remplacer n par N , l'indice complexe. On remarque que les équations deviennent rapidement compliquées et sont ainsi plus difficiles à traiter. À angle d'incidence normale, on peut par contre déterminer la réflectance :

$$R_s = R_p = \frac{(n_0 - n_1)^2 + k_1^2}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2} \quad (2.56)$$

Maintenant que nous connaissons les valeurs de r et t à une interface, il s'agit de généraliser pour le cas d'une couche mince. Il faut, dans ce cas-ci, tenir compte de la phase du faisceau incident afin d'additionner les multiples réflexions aux interfaces (voir figure 2.15). Voici donc les composantes que nous obtiendrons aux différentes interfaces :

$$r_1 = \frac{(n_0 - n_1)}{(n_0 + n_1)} \quad (2.57)$$

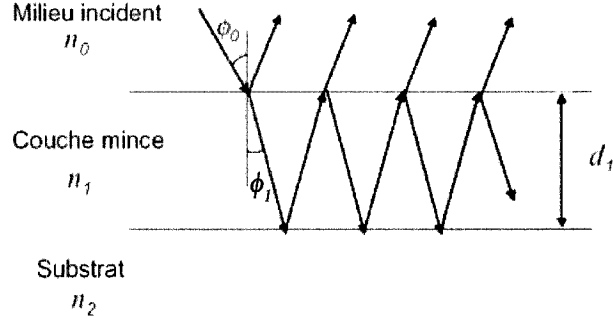


Figure 2.15: Réflexions multiples dans le cas d'une couche mince.

$$t_1 = \frac{2n_0}{(n_0 + n_1)} \quad (2.58)$$

$$r_2 = \frac{(n_1 - n_2)}{(n_1 + n_2)} \quad (2.59)$$

$$t'_1 = \frac{2n_1}{(n_0 + n_1)} \quad (2.60)$$

$$r'_1 = -r_1 \quad (2.61)$$

Le changement de phase est quant à lui donné par :

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n d \cos(\phi_1). \quad (2.62)$$

avec d l'épaisseur de la couche et ϕ_1 l'angle de réfraction dans la couche (donné par la loi de Snell-Descartes : $n_0 \sin \phi_0 = n_1 \sin \phi_1$). En tenant compte de la phase et en additionnant les réflexions multiples, on obtient :

$$R_{\text{total}} = r_1 + t_1 t'_1 r_2 e^{-2i\delta} + t_1 t'_1 r'_1 r_2^2 e^{-4i\delta} + t_1 t'_1 r_1^2 r_2^3 e^{-6i\delta} + \dots \quad (2.63)$$

On remarque que cette sommation est l'équivalent d'une série géométrique. On peut donc résumer l'équation 2.63 par

$$R_{\text{total}} = \frac{r_1 + t_1 t'_1 r_2 e^{-2i\delta}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta}} \quad (2.64)$$

Ce qui, puisque $t_1 t'_1 = 1 - r_1^2$, nous donne :

$$R_{\text{total}} = \frac{r_1 + r_2 e^{-2i\delta}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta}} \quad (2.65)$$

Le même raisonnement s'applique pour la transmission. Le résultat final pour la réflexion et transmission en intensité et à angle d'incidence normale est donné par :

$$R_{\text{total}} = \frac{(n_0^2 + n_1^2)(n_1^2 + n_2^2) - 4n_0n_1^2n_2 + (n_0^2 - n_1^2)(n_1^2 - n_2^2) \cos 2\delta_1}{(n_0^2 + n_1^2)(n_1^2 + n_2^2) + 4n_0n_1^2n_2 + (n_0^2 - n_1^2)(n_1^2 - n_2^2) \cos 2\delta_1} \quad (2.66)$$

et

$$T_{\text{total}} = \frac{8n_0n_1^2n_2}{(n_0^2 + n_1^2)(n_1^2 + n_2^2) + 4n_0n_1^2n_2 + (n_0^2 - n_1^2)(n_1^2 - n_2^2) \cos 2\delta_1} \quad (2.67)$$

Puisque nous connaissons les équations pour R_{total} et T_{total} , il semblerait simple de trouver ces valeurs pour un système multicouche. Par contre, ceci n'est pas le cas. En effet, les équations deviennent excessivement compliquées lorsqu'il y a plus d'une couche. Il existe tout de même des astuces qui permettent de simplifier les calculs, telles que la méthode des ondes résultantes, l'admittance optique ainsi que l'approche matricielle. Puisque c'est cette dernière qui a été utilisée, les bases de celle-ci sont présentées dans la section suivante.

2.3.5.1 L'APPROCHE MATRICIELLE

Nous venons de voir les équations qui décrivent le cas d'une seule couche mince. Il est évident que le fait d'ajouter une seconde couche rendra le système d'équations encore plus complexe. C'est la raison pour laquelle l'approche matricielle a été développée. En fait, chacune des couches peut être représentée par une matrice de la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} \cos \delta_m & (i \sin \delta_m)/\eta_m \\ i \sin \delta_m \eta_m & \cos \delta_m \end{pmatrix} \quad (2.68)$$

avec δ le déphasage donné par :

$$\delta_m = \frac{2\pi}{\lambda} N_m d \cos \theta_m \quad (2.69)$$

et η_m l'admittance optique :

$$\eta_m = \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} N_m \cos \theta_m \quad (2.70)$$

pour une polarisation s et

$$\eta_m = \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} N_m / \cos \theta_m \quad (2.71)$$

pour une polarisation p . ϵ_0 est la permittivité du vide, μ_0 sa perméabilité et m est un entier identifiant la couche.

Il s'agit alors de faire le produit des matrices afin d'obtenir la réflexion et transmission d'un réseau de couches. De plus, grâce à la méthode matricielle, il est aisé de démontrer que la transmission est indépendante de la direction selon laquelle on illumine un filtre, tout simplement en inversant le produit des matrices. Par contre, la réflexion et l'absorption en sont dépendantes. Cette propriété des filtres sera très utile lors du traitement des différents dispositifs fabriqués.

Ceci dit, pour plus de détails sur l'approche matricielle, le lecteur trouvera tout ce qu'il désire dans le livre de H. A. Macleod [33] ou dans le mémoire de S. Larouche [34].

2.3.6 LES SYSTÈMES OPTIQUES

Armé de la théorie de l'optique des couches minces, il est possible de prédire l'allure qu'aura un spectre en transmission et en réflexion de toute structure de couches minces. Pour ce faire, il faut toutefois posséder les relations de dispersion des matériaux utilisés. Nous allons voir dans cette section des structures typiques qui sont utilisées, soit les filtres quart d'ondes et les Fabry-Pérot.

2.3.6.1 LES FILTRES QUART D'ONDE

Définissons tout d'abord ce qu'est une couche quart d'onde et demi-onde (voir tableau 2.5). Pourquoi porter autant d'attention à ces deux conditions ? Il s'adonne que des phénomènes d'interférence intéressants se produisent à ces épaisseurs. Prenons le cas d'une couche de Ta_2O_5 ($n = 2,10$) sur un substrat de verre ($n = 1,45$). Si l'on trace la réflectance de cette couche en fonction de son épaisseur, on observe une oscillation périodique. De plus, aux épaisseurs qui sont des multiples d'épaisseur quart d'onde, on observe des maxima et pour des épaisseurs demi-onde, des minima. En fait, ces minima correspondent à la réflexion du substrat, tout comme si la couche n'existait tout simplement pas ! Une couche demi-onde n'a donc aucun effet sur un substrat à une longueur d'onde donnée (et ses multiples). Ces résultats s'expliquent par une interférence constructive maximale pour les quarts d'onde et destructive dans l'autre cas. Pour qu'il y ait interférence constructive entre le premier faisceau réfléchi et le deuxième, il faut un déphasage de 2π ou un multiple entre les deux. Par contre, lors des calculs de déphasage, il ne faut pas oublier que pour un faisceau réfléchi, il y aura déphasage de π lorsque l'on passe d'un milieu d'indice bas à élevé (« low to high phase shift π , high to low phase shift zero »). Voici ce que l'on obtient pour les épaisseurs quart

Tableau 2.5: Définition des épaisseurs quart d'onde et demi-onde.

Quart d'onde	Définition
Épaisseur physique	$d = \lambda/4n$
Épaisseur optique	$nd = \lambda/4$
Demi-onde	Définition
Épaisseur physique	$d = \lambda/2n$
Épaisseur optique	$nd = \lambda/2$

d'onde et demi-onde d'une couche d'indice de réfraction plus élevé que celui du substrat :

$$d = (2m - 1) \frac{\lambda}{4n \cos(\phi_1)} \quad \text{pour } m > 0 \quad (2.72)$$

$$d = (2m) \frac{\lambda}{4n \cos(\phi_1)} \quad \text{pour } m > 0 \quad (2.73)$$

De plus, on remarque également un autre élément très important en ce qui concerne les filtres optiques. Si on isole λ et que l'on garde l'épaisseur constante, on obtient l'équation suivante :

$$\lambda = (2m - 1)4nd \cos(\phi_1) \quad (2.74)$$

On remarque que, si l'angle d'incidence augmente et, par conséquent, ϕ_1 aussi selon la loi de Snell-Descartes, λ diminue. Ainsi, le maximum en réflexion va se déplacer vers les courtes longueurs d'onde. Ceci est dû à une diminution du parcours optique, ce qui peut paraître contre-intuitif puisque la distance parcourue par le faisceau semble augmenter. On comprend donc pourquoi tout spectre d'un filtre interférentiel se déplacera vers les courtes longueurs d'onde lorsque l'angle d'incidence augmente. De plus, selon la loi de Snell-Descartes, plus l'indice de réfraction d'une couche est faible, plus l'angle de réfraction dans celle-ci sera élevé. Le changement en épaisseur optique sera donc plus grand. En conclusion, des filtres ayant un indice de réfraction équivalent bas changeront plus rapidement de couleur en fonction de l'angle.

Autre fait intéressant, on remarque qu'il y aura d'autres maxima présents sur le spectre en réflexion aux autres longueurs d'onde qui remplissent la condition d'interférence constructive. Leurs positions exactes ne peuvent être déterminées par l'équation précédente sans avoir la relation de dispersion de la couche en question.

Il faut également noter que les conditions s'inversent lorsque la couche déposée est d'indice plus faible que le substrat sur lequel elle se trouve.

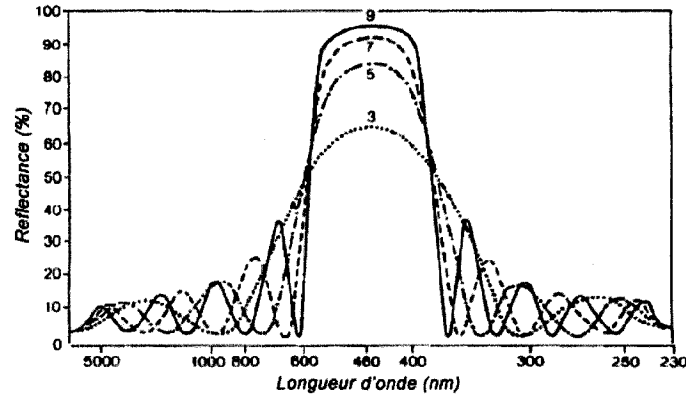


Figure 2.16: Filtre quart d'onde à 460 nm. Tirée de [32].

Alors, lorsque l'on parle de filtre quart d'onde, il s'agit ainsi d'une superposition de couches d'épaisseur quart d'onde dont l'une à un indice élevé et l'autre bas. Par exemple, (HL)¹⁰ est une notation qui est généralement utilisée afin d'indiquer que le filtre en question est composé d'une couche d'indice élevée (H = « High ») et une d'indice plus bas (L = « Low ») et ce, répété dix fois pour un total de 20 couches. S'il fallait faire le raisonnement précédent, on remarquera que chaque faisceau réfléchi aux interfaces des couches successives possède un déphasage de $2\pi m$ radians. Ils interfèrent donc tous constructivement. Le filtre présenté consiste ainsi en un miroir très efficace pour une longueur d'onde spécifique. La figure 2.16 présente l'évolution de ce type de filtre en fonction du nombre de couches.

On remarque qu'initialement la réflectance augmente rapidement, mais que, rendue à un certain nombre de couches, celle-ci augmente de moins en moins vite. Les filtres quart d'onde sont donc une bonne façon de débuter le design d'un dispositif de sécurité optique puisqu'ils permettent d'obtenir plusieurs variations de couleur tout dépendant de la région du spectre qui sera réfléchie.

2.3.6.2 FABRY-PÉROT

Un autre type de filtre qui m'a été utile est le Fabry-Pérot. Celui-ci est constitué de deux miroirs séparés par une couche d'épaisseur demi-onde. Cette configuration permet de cibler une longueur d'onde particulière et d'ainsi obtenir un filtre en transmission très raffiné. Les miroirs peuvent être faits à base de métaux, mais étant donné que tout métal est également absorbant, des pertes en transmission sont ainsi inévitables. On remplace donc

les miroirs métalliques par des miroirs diélectriques. La formule décrivant ce type de filtre est donc la suivante : $(HL)^m(HH)(LH)^m$, avec m un entier. Il paraît contre-intuitif qu'un filtre contenant deux miroirs réfléchissant pratiquement toute la lumière à une longueur d'onde spécifique puisse tout de même transmettre cette même longueur d'onde. En fait, ce phénomène s'explique par une interférence constructive qui se fait dans la cavité centrale qui amplifie ainsi le peu de lumière qui y pénètre.

Il est évident qu'il existe une panoplie d'autres filtres qui pourraient être présentés. Mentionnons entre autres les filtres antireflets qui représentent probablement à eux seuls l'une des applications majeures des filtres interférentiels. Par contre, n'ayant pas utilisé ceux-ci lors de mon projet, il suffit de savoir que le filtre antireflet le plus simple consiste en une couche quart d'onde dont l'indice équivaut à $n = \sqrt{n_0 n_{sub}}$.

2.3.6.3 APPLICATIONS POUR LA SÉCURITÉ

Je présente dans cette section l'application particulière des filtres interférentiels au domaine de la contrefaçon.

LA BANQUE DU CANADA

Le tout premier dispositif ISIS (Interference Security Image Structure) sur de la monnaie, changeant d'une couleur dorée à verte, a été mis en circulation sur les billets de 50\$ de la BdC en décembre 1989 [2, 10]. À l'époque, le nombre de couches de ce système avait été diminué à cinq (initialement 13 couches) afin d'amoinrir les coûts. Les couches en question était du SiO_2 et du ZrO_2 et déposées sur un polymère de polyéthylène à faible adhésion (« release-coated »). Le tout était ensuite transféré sur le billet à l'aide d'une colle noire photosensible aux ultraviolets. De nos jours, la BdC a remplacé les cinq couches précédentes par un mélange métal/diélectrique de trois couches. La forte réflexion des métaux permet de diminuer le nombre de couches nécessaires et élimine également la nécessité d'utiliser un adhésif noir.

L'ENCRE À VARIATION DE COULEUR

La Banque des États-Unis d'Amérique utilise quant à elle de l'encre à variation de couleur [35, 36] (« color shifting ink » de Flex Products). Le système de couches minces dans ce cas-ci est constitué de cinq couches. Une couche d'Al servant de couche réfléchissante constitue l'élément central du filtre. Suit ensuite une couche de MgF_2 permettant de jouer avec la phase de la lumière incidente. C'est l'épaisseur de cette couche qui permettra de contrôler la couleur finale obtenue. Finalement, une couche de chrome permet d'ajouter une

absorption sélective et ainsi d'accroître la coloration du filtre. Les deux dernières couches sont déposées symétriquement autour de la couche métallique. Le tout est alors enlevé du substrat de polymère et moulu en une poudre fine. Cette poudre est mélangée à un médium permettant ainsi de créer une encre. Les particules étant très minces et relativement larges, elles se déposeront toujours à plat une fois l'encre séchée. Voilà la raison pour laquelle ces particules sont symétriques. Plus de 40 pays utilisent présentement cette technologie.

MODIFICATIONS SUPPLÉMENTAIRES

Afin d'accroître la complexité de ces dispositifs, plusieurs techniques peuvent être utilisées. Entre autres, la création d'un motif par l'utilisation d'un laser, de masquage lors de la déposition, par impression telle qu'avec l'encre présentée, par transfert, etc.

Ceci dit, les tendances actuelles sont surtout axées sur la combinaison des phénomènes de diffraction et d'interférence sur un même dispositif [25, 26]. Par contre, cette combinaison rend le dispositif relativement complexe à interpréter. L'incorporation de couches magnétiques fait également partie des développements récents [37, 38] afin d'ajouter une information encodée. L'objectif de mes travaux était donc d'ajouter d'autres propriétés innovatrices aux ISIS.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Cette section présente la méthode de déposition qui a été utilisée afin de fabriquer les filtres interférentiels qui seront présentés au chapitre suivant. Suivront les techniques de caractérisation optique et mécanique qui ont été utilisées afin d'obtenir les différents paramètres physiques nécessaires à l'obtention de ces filtres.

3.1 LA PULVÉRISATION PAR DOUBLE FAISCEAUX D'IONS

Il existe une panoplie de méthodes de déposition. Cette section a pour but d'exposer tout d'abord le fonctionnement, mais également les avantages obtenus grâce à la pulvérisation par double faisceaux d'ions (Dual Ion Beam Sputtering - DIBS), technique que j'ai utilisée afin de réaliser tous les filtres qui seront présentés au chapitre suivant.

Les faisceaux d'ions ont été inventés dans les années soixante suite au besoin d'un mode de propulsion efficace dans l'espace [39]. Leur utilisation dans le domaine de la déposition des filtres optiques est relativement récente et date des années soixante-dix. Ce type de pulvérisation est surtout devenue populaire suite au besoin d'avoir des filtres optiques (miroirs) très efficaces (moins de 10 ppm de pertes), tandis que les autres techniques de déposition telles que la déposition par plasma radio fréquentiel (RF), pulvérisation magnétron, évaporation par faisceau d'électrons, etc. n'offraient pas des résultats satisfaisants [40]. Ces méthodes sont tout de même couramment utilisées. De plus, plusieurs d'entre elles sont présentement combinées avec une source d'ions d'assistance (Ion Beam Assisted Deposition - IBAD) et offrent des résultats très comparables [41]. D'autres méthodes, comme le PECVD [42], offrent des taux de déposition rapide et une versatilité au niveau des indices de réfraction disponibles. Le plasma génère lui aussi un bombardement ionique à la surface de l'échantillon, permettant d'obtenir des propriétés mécaniques et optiques comparables aux autres techniques IBAD.

3.1.1 LA PULVÉRISATION

On définit la pulvérisation comme étant une série d'évènements entraînant l'éjection d'un atome d'une cible causée par l'impact d'un ion (« billard atomique ») [43]. Les ions transfèrent ainsi leur moment cinétique aux atomes de la surface. Lorsqu'un ion atteint la

surface, plusieurs éventualités peuvent se produire : il peut être réfléchi ou adsorbé, il peut éjecter des atomes de la surface ou il peut s'implanter sous la surface. Tout dépend de son énergie initiale. Le bombardement par des ions possède donc plusieurs applications [44], dont la déposition, l'implantation, l'analyse, la gravure, etc.

Il existe plusieurs techniques de pulvérisation, entre autres, la pulvérisation DC et RF, la pulvérisation magnétron, par faisceau d'ions, etc. Dans notre cas, les cibles ont été pulvérisées par l'utilisation d'un faisceau d'ions d'argon.

Afin de limiter la texturation de la cible, celle-ci est généralement mise en mouvement (mouvement angulaire faible de quelques degrés ($3,5^\circ$ dans mon cas)) et les substrats sont mis en rotation afin d'accroître l'homogénéité de la couche.

L'avantage de la déposition par DIBS est justement la seconde source d'ions. La prochaine section présente les avantages de l'assistance par faisceau d'ions.

3.1.2 L'ASSISTANCE PAR FAISCEAU D'IONS

Puisque la structure physique d'une couche mince est reliée à la mobilité des adatoms, il est clair que le faisceau d'assistance aura un effet direct sur celle-ci [45]. On s'entend pour dire que cet effet sur la croissance [46] peut être résumé par l'énergie que reçoit chacune des particules déposées :

$$E_p \sim E_i(\Phi_i/\Phi_n) \quad (3.1)$$

où E_i est l'énergie des ions qui bombardent, Φ_i leur flux et Φ_n le flux des particules déposées. Cette énergie, qui est apportée par les ions du faisceau d'assistance, est d'ailleurs bien définie avec un étalement typique de 10 eV [47], contrairement à un plasma qui possède une large gamme d'énergie. Elle permet de diminuer la température du substrat lors de la déposition comme le montre clairement le modèle de structure de zone à la figure 3.1. Sachant qu'une augmentation du potentiel du substrat augmentera le bombardement ionique et puisque la zone T est celle qui nous intéresse, on remarque qu'effectivement, une augmentation du bombardement permet de diminuer la température du substrat. Ceci est directement comparable à la déposition par DIBS. Cette baisse en température est un avantage, car le chauffage limite directement le type de substrat sur lequel on peut déposer.

Il est possible d'évaluer E_p grâce à la relation suivante, qui nous permet de calculer Φ_n :

$$\Phi_n = r_D \rho N_A / m_A \quad (3.2)$$

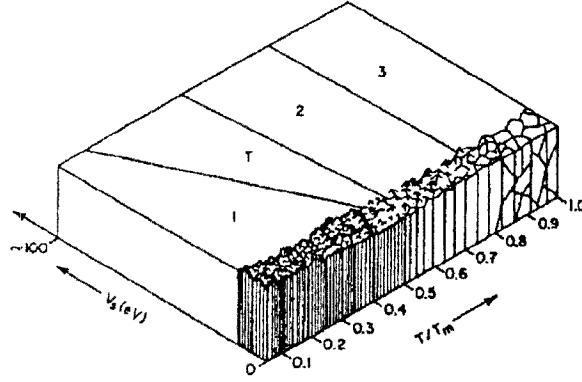


Figure 3.1: Modèle de structure de zone pour la pulvérisation RF. T_m est la température de fusion du matériau et V_s le potentiel du porte-substrat. La zone 1 est contrôlée par effet d'ombrage, les zones T et 2 par la diffusion de surface et la zone 3 par la diffusion en volume. Tirée de [48].

avec r_D la vitesse de dépôt, ρ la densité (2,3 g/cm³ pour le SiO₂ et 8,2 g/cm³ pour le Ta₂O₅), N_A la constante d'Avogadro et m_A la masse moléculaire (60 g/mol et 442 g/mol). La figure 3.2 affiche le rapport Φ_i/Φ_n en fonction de l'énergie des ions et permet ainsi de choisir les paramètres du faisceau d'assistance de façon plus éclairée [50]. En appliquant cette approche aux techniques de dépôt assistés par bombardement ionique, notamment le PECVD, IBAD, dépôt par pulvérisation par magnétron et DIBS, on obtient les résultats affichés à la figure 3.3. Cette dernière donne le sommaire des énergies et des rapports Φ_i/Φ_n les plus appropriés pour la fabrication des couches optiques [42].

Penchons nous plus en détail sur ce qui se passe lors de l'arrivée des ions du faisceau d'assistance. Lorsqu'ils pénètrent dans la couche, ils déplacent des atomes en leur transférant leur énergie, qui eux, vont ensuite également déplacer des atomes. On obtient ainsi une cascade de collisions. Ces atomes déplacés vont alors se loger dans des microporosités de la couche formant ainsi une couche plus dense. De plus, tous ces atomes créent de nouvelles porosités en surface, qui seront remplies par les atomes pulvérisés de la cible. Quelques-uns des ces atomes peuvent également être pulvérisés et sortir de la couche. Ceci dit, si l'ion incident ne possède pas assez d'énergie pour déplacer un atome, il crée entre autres des vibrations dans le réseau (phonons). On utilise généralement l'argon comme gaz inerte étant donné son faible coût. Par contre, l'utilisation de gaz tel le krypton offre certains avantages, tels qu'un plus grand transfert de moment cinétique avec des atomes lourds et une plus faible incorporation de ceux-ci dans la couche déposée. Les particules énergétiques

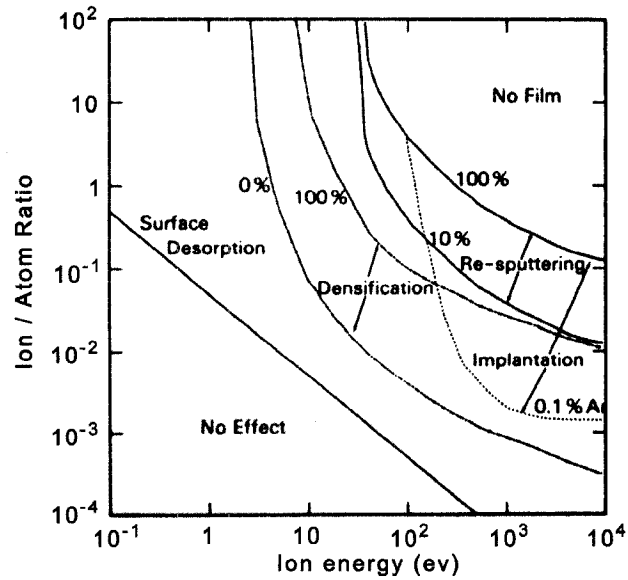


Figure 3.2: Rapport ion/atome en fonction de l'énergie du faisceau d'assistance. Tirée de [49]

permettent ainsi d'accroître la mobilité de surface des adatoms, promeuvent les réactions chimiques et la diffusion par chauffage et introduisent des défauts de surface en changeant la chimie de surface ainsi que des sites de nucléation. Par contre, si le bombardement est trop énergétique et la température du substrat basse, une grande incorporation de gaz peut mener à la formation de porosité. Sans compter que ceci peut également avoir pour effet d'accroître le coefficient d'absorption dans la couche déposée, car le bris de certaines liaisons moléculaires et également une pulvérisation préférentielle altéreront la structure chimique de la couche.

Le bombardement ionique est aussi utilisé depuis très longtemps afin de nettoyer la surface des substrats avant de faire un dépôt. La surface d'un substrat peut également être gravée, une autre application commune des faisceaux d'ions.

L'un des problèmes majeurs qui survient lors de l'utilisation de filtres optiques est leur stabilité. En effet, la plupart des matériaux déposés présentent une structure poreuse. La vapeur d'eau, présente dans pratiquement tous les environnements, peut ainsi pénétrer dans la structure multicouche d'un filtre par capillarité [51]. Les couches obtenues par assistance ionique sont plus denses, et par conséquent, possèdent des indices de réfraction plus élevés. Un indice plus élevé diminue également le nombre de couches nécessaires afin d'obtenir

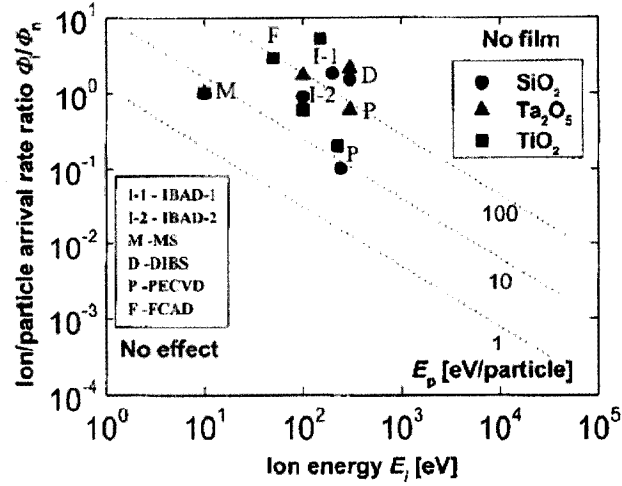


Figure 3.3: Énergie et rapport des flux d'ions afin d'obtenir des propriétés optiques optimisées pour plusieurs techniques de dépôt. Tirée de [41]

un filtre particulier. Une plus grande densité permet aussi d'augmenter la résistance à la corrosion, à la gravure chimique, d'obtenir une plus grande dureté, etc.

Mais les avantages de l'assistance ionique sont encore plus nombreux [49]. On observe généralement une meilleure stoechiométrie [52, 53] ainsi qu'une meilleure adhésion au substrat [54]. Le mélange atomique généré permet la création d'une région de transition entre les couches (interphase), ce qui accroît l'adhérence. En effet, des ions incidents de quelques centaines d'eV, rencontrant une couche avec une densité de 80%, pénètrent à une distance moyenne de quelques nanomètres dans celle-ci [55], créant ainsi tout un chambardement.

De part la bonne stoechiométrie, l'absorption dans les couches optiques est très faible, caractéristique des plus importantes pour plusieurs applications modernes. Il est également possible de contrôler le stress dans les couches en variant les propriétés du faisceau d'assistance. Ce stress, qui est généralement en compression (dû à l'implantation par recul des atomes de surface [46]), dépend significativement du ratio entre les particules qui bombardent et celles qui sont déposées. La microstructure des couches évaporées peut également être contrôlée par ce deuxième faisceau d'ions et celle-ci dépend de plusieurs paramètres qui influencent l'interaction entre le flux d'atomes incidents et la surface du substrat. Entre autres, au niveau de la surface du substrat : polie ou rugueuse, sa température, sa composition, sa propreté et sa microstructure (cristalline ou amorphe) auront un effet marquant. Tandis qu'au niveau des ions incidents, la densité de courant, la composition et le type d'ions

(neutres, espèces activées, radicaux libres, agrégats, etc.), la distribution énergétique, le flux ainsi que la direction et le rapport ion-atome incident auront tous des effets différents.

Lors de la déposition d'oxydes, on peut ainsi procéder de deux façons. Soit directement en utilisant une cible du composé que l'on désire déposer et tout simplement la pulvériser ou déposer selon son élément solide (Al, Si, etc.) sous atmosphère avec l'élément gazeux désiré (O_2 , N_2 , etc.). La méthode retenue est généralement la deuxième. De plus, afin d'améliorer la qualité de la couche, le faisceau d'assistance contiendra lui aussi l'élément gazeux désiré. Par exemple, dans notre cas, lors de la déposition des couches de SiO_2 et de Ta_2O_5 [51, 56], le faisceau d'assistance est composé d' O_2 et d'Ar dans un rapport de 4:1, malgré le fait que la couche de SiO_2 provienne directement d'une cible de silice. De plus, lors du dépôt d'un composé, puisque le bombardement ionique pulvérisera préférentiellement le composé gazeux, un environnement riche en ce même gaz est nécessaire afin d'assurer la stoechiométrie.

3.1.3 CRÉATION DU FAISCEAU D'IONS

Le DIBS fonctionne avec des sources d'ions RF (voir figure 3.4). Le gaz à ioniser est introduit dans une chambre de quartz où un signal radio fréquence est généré (13,56 MHz) afin d'ioniser le gaz. Le plasma contenu dans la chambre de décharge contient un nombre égal d'ions et d'électrons, en plus d'un grand nombre d'atomes neutres. Les électrons étant très légers et énergétiques, leur mobilité sera plus élevée que celles des ions et ils auront tendance à être attirés par toute surface positive par rapport au plasma. Ainsi, le plasma possédera un potentiel d'environ 25 V de plus que la grille écran (élément ayant le potentiel positif le plus élevé). Certains des ions produits atteindront les deux grilles du système d'accélération et seront concentrés par la grille écran positive et accélérés par la grille négative d'accélération. La grille écran protège la grille accélératrice du bombardement directe des ions. Puisque la densité du plasma est proportionnelle à la puissance des ondes RF générées, le courant du faisceau peut être contrôlé indépendamment de son énergie. La décharge se faisant sans filament, contrairement à d'autres types de source, la maintenance est donc moins souvent requise [57].

Les ions du plasma peuvent subir l'un des deux sorts suivants : soit qu'ils entrent en collision avec une paroi et collectent un électron, devenant ainsi neutre et retournant au plasma, soit qu'ils sortent de la chambre de décharge. Rendus à une certaine distance, les ions positifs « sentiront » le potentiel négatif de la grille d'accélération. L'énergie du faisceau final sera donc égale à la différence de potentiel entre la chambre de décharge et

la masse du système. Le système du DIBS fournit directement cette valeur de potentiel (« Beam Voltage »), qui est équivalente au potentiel positif appliqué à la grille écran plus les 25 V du plasma. Les ions seront également accélérés par le potentiel négatif de la grille

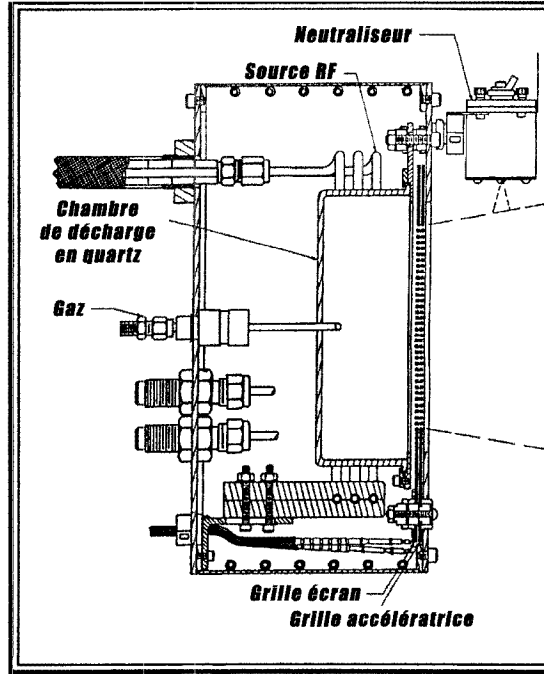


Figure 3.4: Schéma de la source d'ions RF [58].

d'accélération, mais ils seront également décélérés juste après leur sortie. Pourquoi alors avoir une grille d'accélération ? La première raison est que, sans le potentiel négatif de cette grille, les électrons fournis par le neutraliseur à la sortie entreraient dans la chambre de décharge (« electron backstreaming »). La tension d'accélération doit ainsi être maintenue assez élevée. La deuxième raison est que cette grille permet d'accroître le courant du faisceau (qui varie en $V_{total}^{3/2} = (V_{faisceau} + V_{accel})^{3/2}$) [59]. Finalement, elle permet aussi de modifier la divergence du faisceau. De plus, il est important de savoir qu'il y a déposition des atomes pulvérisés sur la surface extérieure de la grille, ce qui explique la nécessité d'un entretien régulier.

Un neutraliseur à la sortie fournit des électrons au faisceau positif et fonctionne également avec une source RF. En plus de neutraliser le faisceau d'ions, il permet également d'éviter l'accumulation de charges. Le neutraliseur se trouve à l'extérieur de la trajectoire

des ions émis afin d'éviter qu'il ne se fasse graver et ainsi contaminer les couches déposées.

Les paramètres importants à retenir pour un faisceau d'ions sont donc l'énergie des ions incidents et la densité de courant (mA/cm^2). Dépendamment des applications, on peut avoir des énergies allant de 25 à 1000 eV [47, 60].

3.1.4 FONCTIONNEMENT DU DIBS

L'appareil DIBS qui a été utilisé dans le cadre de ce projet est un Spector II (Veeco/Ion Tech) (voir figure 3.5). Afin de réaliser un dépôt, la procédure suivante a été suivie. Il s'agit tout d'abord de s'assurer que le système ait atteint une pression minimale (2×10^{-6} torr). Il est également possible de chauffer à une température définie pendant le dépôt grâce à deux lampes situées dans la chambre. Une fois la pression voulue atteinte, les deux faisceaux d'ions sont allumés et un certain temps leur est alloué afin qu'ils se stabilisent. Suit la pulvérisation des cibles (SiO_2 , Ta et Nb), d'une taille de 35 cm de diamètre, par un faisceau d'argon de 16 cm de diamètre, pendant que les substrats sont cachés derrière l'obturateur. Ceci permet de nettoyer les cibles tout en couvrant également les contaminants sur les parois de la chambre. Lors de la déposition du SiO_2 et du Ta_2O_5 , un autre faisceau d'ions composé

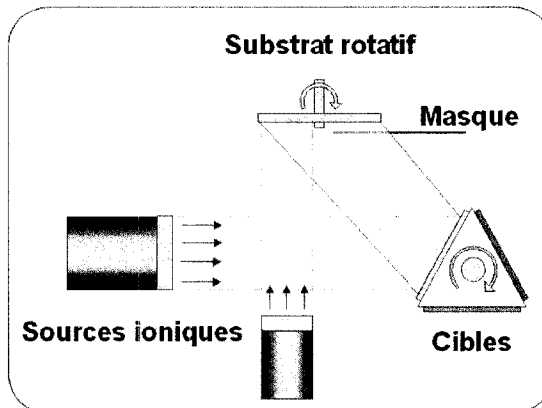


Figure 3.5: Schéma du DIBS.

d' O_2 et d'Ar, d'un diamètre de 12 cm, est envoyé sur les substrats. En théorie, quatre paramètres permettent de contrôler le taux de dépôt : le courant du faisceau (fonction de la puissance des ondes RF, de la pression, de la distance entre les grilles et de leur alignement), la distance entre la cible et le substrat, l'angle entre la cible et le faisceau (plus que 45 degrés) et l'angle entre la cible et le substrat. Dans notre cas, seul l'angle de la cible et le courant

du faisceau peuvent être changés parmi ces quatres options. Les paramètres utilisés lors de la fabrication des filtres sont donnés au tableau 3.1.

Tableau 3.1: Paramètres de déposition.

Propriétés	SiO ₂	Ta ₂ O ₅
Température du substrat (°C)	100	100
Voltage du faisceau de pulvérisation (V)	1250	1250
Courant du faisceau de pulvérisation (mA)	600	600
Voltage du faisceau d'assistance (V)	400	550
Courant du faisceau d'assistance (mA)	75	150
Taux de dépôt (nm/s)	0,21	0,29

Pour des dépôts sur de grandes surfaces et afin d'obtenir un dépôt uniforme, la distance cible-substrat est généralement grande, le substrat est mis à un certain angle et en rotation (600 rpm). Il est important d'ajouter que dans le cas de notre appareil, l'ajout d'un masque lors de la déposition est nécessaire. Ce masque permet de modifier la forme du faisceau de bombardement afin d'accroître l'uniformité des couches déposées.

3.2 CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

3.2.1 TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION OPTIQUE

Nous venons de voir comment les filtres optiques ont été déposés. La prochaine section présente les techniques de caractérisation optique qui ont rendu possible le design et la fabrication efficaces des filtres interférentiels qui suivront.

3.2.1.1 ELLIPSOMÉTRIE SPECTROSCOPIQUE À ANGLE VARIABLE

L'ellipsométrie spectroscopique à angle variable (VASE de J. A. Woollam Co., Inc.) a été utilisée afin d'effectuer la caractérisation optique de mes couches. Cette technique m'a permis d'obtenir les propriétés optiques des couches analysées, soit leurs courbes de dispersion pour l'indice de réfraction et le coefficient d'extinction, leur épaisseur ainsi que leur uniformité et finalement, leur rugosité de surface. La similitude entre les designs et les résultats obtenus est le fruit de cette caractérisation, puisque l'épaisseur permet d'évaluer les taux de dépôt du Ta_2O_5 et du SiO_2 et l'indice de réfraction permet d'obtenir les bonnes épaisseurs optiques lors de l'étape de design.

Le principe de l'ellipsométrie est relativement simple [61, 62]. Lorsque la lumière est réfléchiée à une interface, nous avons vu que l'amplitude et la phase des polarisations s et p sont différentes sauf à incidence normale. L'ellipsométrie mesure ainsi le rapport d'amplitude, notée Ψ et le déphase, notée Δ , entre ces deux polarisations à des angles d'incidences obliques. Ainsi, elles sont reliées par l'équation suivante :

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan \Psi e^{i\Delta} \quad (3.3)$$

où ρ est le rapport complexe des coefficients de Fresnel r_p et r_s vus précédemment. Lors d'une prise de mesure, l'appareil obtient les valeurs Ψ et Δ à toutes les longueurs d'onde désirées et aux angles voulus. Le logiciel *WVASE32* permet alors de comparer les données expérimentales avec celles générées par l'entremise d'un modèle ellipsométrique. Le meilleur modèle est obtenu lorsque la valeur minimale de MSE (Mean Square Error) est trouvée et ce, en optimisant les paramètres du modèle. Évidemment, plus la quantité de données mesurées sera grande, plus la précision et la fiabilité des résultats obtenus seront bonnes.

Une fois les propriétés optiques obtenues, l'étape suivante consiste à les incorporer dans un modèle de design afin de pouvoir modéliser correctement les futurs dépôts. Dans mon cas, j'ai utilisé le logiciel *TFCalc 3.4* de Spectra Physics, Inc.

3.2.1.2 SPECTROPHOTOMÉTRIE

Une fois les filtres déposés, afin d'obtenir leurs spectres en réflexion et en transmission et ainsi calculer leur couleur, j'ai utilisé un spectrophotomètre Perkin-Elmer Lambda 19 [63]. Cet appareil permet de faire des mesures en transmission à angle normal et jusqu'à 75° par incrément de 5° pour des longueurs d'onde allant de 175 nm à 3200 nm. Par contre, il est important à noter que les mesures à angles obliques ont été obtenues par l'ajout d'un dispositif fait maison et que, pour de grands angles d'incidence, les spectres acquis manquent de précision (quelques pourcents). Dans le cas des filtres métal-diélectrique, il a fallu également obtenir les spectres en réflexion. Deux types de mesure sont alors possibles. Soit une mesure spéculaire à un angle de 7,5° (configuration VW), soit une mesure de la réflexion totale à 8° par l'utilisation d'une sphère d'intégration (Labsphere). Cette sphère permet également d'obtenir seulement la composante en réflexion diffuse. Rappelons que dans le cas des filtres interférentiels, la réflexion est à toute fin pratique spéculaire. Afin d'obtenir la réflexion à des angles obliques, j'ai utilisé le spectrophotomètre Perkin-Elmer Lambda 950 équipé d'un module en réflexion L631 0201 de TNO (Netherlands organisation for applied scientific research).

3.2.2 TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION MÉCANIQUE

3.2.2.1 MESURES DE STRESS

Le stress dans les couches minces est un paramètre très important, puisque celui-ci peut causer, entre autre, la délamination si celui-ci s'avère être trop élevé. Il est possible d'obtenir le stress dans une couche en la déposant sur un substrat dont les propriétés mécaniques sont connues (coefficient de Poisson et module d'Young) et en mesurant la différence de déformation produite. J'ai donc utilisé un appareil de mesure à configuration circulaire (Tencor® FLX-2900). Ce type d'appareil mesure la déflexion au centre d'une gauffre de Si de deux pouces à l'aide d'un laser avant et après la déposition et permet ainsi d'obtenir une mesure du stress par l'intermédiaire de l'équation de Stoney suivante [64] :

$$\sigma = \frac{1}{6R_c} \frac{E_S d_S^2}{(1 - \nu_S) d_f} \quad (3.4)$$

avec E_S le module d'Young du substrat, d_S son épaisseur, ν_S son coefficient de Poisson, R_c son rayon de courbure et d_f l'épaisseur de la couche.

3.2.2.2 MESURES DU MODULE D'YOUNG ET DE LA DURETÉ

La nano-indentation permet d'obtenir les propriétés nanomécaniques d'une couche mince, plus spécifiquement dans ce cas-ci, le module d'élasticité (module d'Young) et la dureté. Un appareil à faible charge est nécessaire afin de procéder à ce type de mesure, dans notre cas, le Hysitron TriboIndenter[®]. Cet appareil offre des charges allant de 10 μN à 10 mN avec une résolution de 1 nN. Il est muni d'une pointe en diamant pyramidale de type Berkovich. La force et le déplacement de la pointe étant très bien contrôlée, il est possible d'obtenir le module d'élasticité, défini comme étant :

$$E_{Young} = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x} \quad (3.5)$$

avec σ_x est la contrainte et ϵ_x la déformation relative. Lors d'une mesure, on obtient E_{Young} par l'intermédiaire de la courbe d'indentation (force en fonction de la profondeur de pénétration). Pour plus de détail, voir l'article de Oliver et Pharr [65].

La dureté, quant à elle, définie comme étant la capacité d'un matériau à résister aux déformations permanentes sous l'effet d'une force, est obtenue grâce à la relation suivante :

$$H = \frac{P_{max}}{A_p} \quad (3.6)$$

avec P_{max} la charge maximale appliquée et A_p l'aire projetée de la marque d'indentation.

3.3 CRÉATION DE MOTIFS

3.3.1 LASER FEMTOSECONDE

Dans le but de créer un motif permettant d'accroître l'aspect esthétique des filtres déposés, j'ai fait quelques essais d'ablation laser, plus spécifiquement en utilisant un laser femtoseconde (Hurricane de Spectra Physics). La longueur d'onde du laser est de 800 nm et chacun des pulses dure 120 fs. Les paramètres pouvant être contrôlés sont la fluence (J/m^2), la vitesse de déplacement du laser, le nombre de pulses par seconde et la taille du faisceau.

3.3.2 PHOTOLITHOGRAPHIE

L'une des techniques les plus utilisées en microfabrication est la photolithographie. Le principe de cette technique est simple. Une photorésine est déposée, à l'aide d'une tournette, sur le substrat. Le substrat et la photorésine sont ensuite chauffés. Le tout est ensuite exposé aux UV selon un certain motif. Les zones exposées, dans le cas d'une photorésine positive, seront ensuite enlevées grâce à un solvant (développeur). Le masque UV que j'ai utilisé a

été designé dans un logiciel de graphisme (*Adobe Photoshop*) et imprimé sur une acétate. Ce type de masque était suffisant pour mes besoins et peu coûteux.

Une fois la création de motifs complétée, la déposition d'un filtre a été effectuée. L'étape finale consistait à faire un «lift-off» grâce à un bain ultrasonique. Il a par contre fallu que j'applique un nettoyage manuel afin de retirer la photorésine, le filtre offrant beaucoup de résistance au bain ultrasonique.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4.1 MATÉRIAUX

Avant de pouvoir fabriquer un filtre, il faut évidemment optimiser les paramètres de dépôt, soit le taux de déposition des différents matériaux afin d'obtenir un bon contrôle au niveau de l'épaisseur des couches, mais également de leurs propriétés optiques. Dans le cas du DIBS, les paramètres de dépôt nous ont été fournis par l'ancien propriétaire. Par contre, il est tout de même nécessaire de caractériser chacun des matériaux puisqu'il y a inévitablement des variations qui sont dues entre autres, à l'état de propreté du système, l'état des sources d'ions, etc. Il est donc important de mentionner que les valeurs qui seront présentées dans les prochaines sections, représentent des valeurs typiques que j'ai obtenues tout au long de mon projet.

4.1.1 COUCHES DIÉLECTRIQUES

4.1.1.1 PROPRIÉTÉS OPTIQUES

Deux matériaux diélectriques ont été utilisés afin de fabriquer les filtres interférentiels, le SiO_2 et le Ta_2O_5 . Les propriétés essentielles à connaître pour pouvoir faire un design de filtres optiques sont évidemment ses propriétés optiques. Celles-ci ont été obtenues grâce à l'utilisation de l'ellipsométrie spectroscopique à angle variable. Le modèle permettant de simuler les résultats est relativement simple et suffisant pour les fins de ce projet. Il est présenté au tableau 4.1.

Les mesures ellipsométriques ont été effectuées sur un substrat de Si, puisque ceci permet

Tableau 4.1: Modèle utilisé afin de trouver la courbe de dispersion des matériaux diélectriques utilisés.

Rugosité de surface
Modèle de Cauchy (équation 2.31)
Oxyde natif
Si (Substrat)

Tableau 4.2: Paramètres de Cauchy du SiO₂ et du Ta₂O₅.

Matériaux	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	α	β	γ
SiO ₂	1,4754	3,9068e-3	0	-	-	-
Ta ₂ O ₅	2,077	1,0663e-2	2,3938e-3	0,022168	6,8802	0,29

de faciliter l'analyse. Une analyse sur verre étant beaucoup plus complexe, surtout dans le cas du SiO₂, puisque ce dernier possède pratiquement le même indice. Ceci dit, ces mesures ont permis d'obtenir l'indice de réfraction et le coefficient d'extinction de ces deux matériaux ainsi que leur épaisseur pour un temps de déposition connu, permettant par le fait même de calculer leur taux de dépôt. Le taux de dépôt du SiO₂ était approximativement de 0,21 nm/s tandis que le Ta₂O₅ se dépose plus vite avec un taux de 0,29 nm/s. Un monitoring de l'épaisseur pendant la déposition en utilisant tout simplement le temps est donc possible et généralement suffisant pour la plupart des filtres qui seront présentés sous peu.

Le tableau 4.2 présente un exemple de coefficients de Cauchy obtenus pour les deux matériaux utilisés.

Pour le SiO₂ à 550 nm, on obtient, dans ce cas-ci, une valeur de n de 1,488. L'incertitude sur n est typiquement d'environ 5×10^{-3} . Évidemment, la précision du modèle optique rentre également en ligne de compte, ce qui rend la détermination de l'incertitude d'autant plus difficile. Pour le Ta₂O₅, on obtient un n de 2,138 et un k de 2×10^{-8} . On remarque que l'oxyde de tantale absorbe dans le visible, mais étant donné son ordre de grandeur, ceci n'a à toutes fins pratiques, aucun effet. De plus, afin de s'assurer de la qualité des couches déposées, des mesures en transmission ont été prises six mois après déposition et les spectres obtenus étaient identiques. Ceci nous indique que les couches sont très denses et ne possèdent qu'une quantité négligeable de porosité [41].

Tableau 4.3: Indice de réfraction à 550 nm du SiO₂ et du Ta₂O₅.

Matériaux	n (550 nm)
SiO ₂	1,488
Ta ₂ O ₅	2,138

4.1.1.2 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

Les mesures flexus ont également permis d'obtenir le stress dans chacune des couches, soit -437 MPa pour le SiO_2 et -2,49 GPa pour le Ta_2O_5 . La valeur obtenue pour le SiO_2 concorde bien avec celle trouvée dans la littérature [41], mais celle du Ta_2O_5 est très différente. Il faut ajouter que les valeurs trouvées sont discutables, puisque le porte substrat du DIBS est fait en sorte qu'il faut appliquer une certaine tension sur les substrat, ce qui inévitablement peut modifier sa courbure et par conséquent, la mesure du stress. Les valeurs de stress sont tout de même en compression, ce qui est généralement le cas pour ce type de technique de déposition.

Le module d'Young ainsi que la dureté des couches, obtenue par nanoindentation, sont présentés au tableau 4.4 et correspondre encore très bien avec littérature[41].

Tableau 4.4: Propriétés mécaniques du SiO_2 et du Ta_2O_5 .

Propriétés	SiO_2	Ta_2O_5
Module d'Young (GPa)	$100,1 \pm 8,8$	$154,2 \pm 8,0$
Dureté (GPa)	$8,7 \pm 0,5$	$6,9 \pm 0,7$

4.1.2 COUCHE MÉTALLIQUE

Certains des filtres déposés contenaient également une couche métallique. Puisque le système de déposition DIBS possède une cible de tantale, c'est ce matériau qui a été utilisé. Encore une fois, l'ellipsométrie spectroscopique m'a permis d'obtenir les propriétés optiques. Cette fois-ci, un modèle contenant quelques oscillateurs (voir tableau 4.5 [62]) a été généré grâce au logiciel *WVASE32*. La figure 4.1 présente les courbes de dispersion obtenues pour n et k dans le visible.

Tableau 4.5: Modèle utilisé afin de trouver la courbe de dispersion du tantale

Rugosité de surface
Combinaison d'un oscillateur de Lorentz et Drude
Oxyde natif
Si (Substrat)

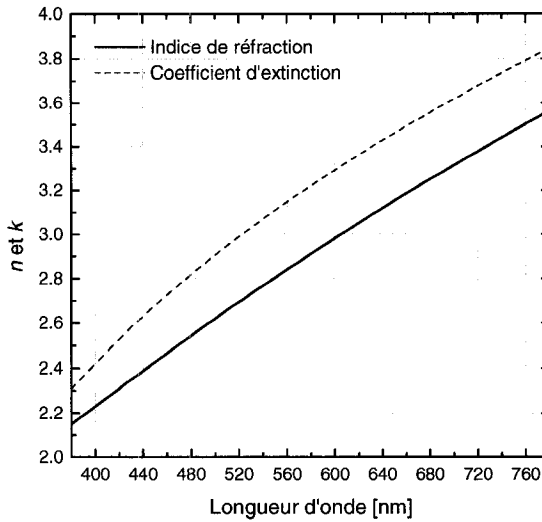


Figure 4.1: Valeurs de n et k en fonction de la longueur d'onde pour le tantale.

Il est important d'ajouter que le tantale est très peu susceptible aux attaques chimiques à des températures inférieures à 150 °C et possède un très haut point de fusion (3290 K). De plus, après 10 nm, il ne reste que 28,6% (à 550 nm) de lumière transmise, ce qui en fait une couche très absorbante. De couleur plutôt grisâtre, sa réflexion n'est que de 53,5% à 550 nm. À des fins de démonstration de principe, ceci est suffisant, mais un métal comme l'aluminium ou l'argent serait préférable lors de la fabrication d'un filtre interférentiel puisque ces métaux réfléchissent beaucoup plus la lumière du visible.

4.2 DESIGNS

La section qui suit présente tous les designs de dispositifs qui ont été développés. Les étapes de conception ainsi que les objectifs visés par chacun de ces designs sont mentionnés. Suite au design, les spectres en transmission et/ou en réflexion sont montrés juxtaposés aux spectres obtenus expérimentalement. Ces spectres permettent alors de faire une analyse colorimétrique en fonction de l'angle d'observation et également sous différentes sources d'illumination. Dans le cas des filtres métamériques, une étude portant sur la variation de couleur en fonction des fluctuations de l'épaisseur des couches lors de la déposition sera ajoutée.

Afin de clarifier le lien entre chacun des designs ainsi que de permettre une meilleure compréhension du processus évolutif, le tableau 4.6 présente tous les designs suivi d'une courte description. De plus, il est à noter, que la plupart des filtres proposés sont utilisés en transmission, contrairement aux dispositifs actuels qui sont majoritairement utilisés en réflexion.

Tableau 4.6: Tableau résumé des designs A à H

Design	Caractéristique	Commentaires
A	Réflecteur - Simple changement de couleur en réflexion et transmission.	Exemple de ce qui est présentement utilisé. L'article [1] présente plusieurs exemples de dispositifs utilisables en réflexion.
B	Réflecteurs - Triple changements de couleur.	Basé sur la superposition de deux filtres.
C	Fabry-Pérot - Changement de couleur inverse en transmission.	Exemple de ce qui est présentement utilisé. L'article [2] contient un exemple en réflexion.
D	Filtres métamériques - Simple changement de couleur.	Utilisation de deux filtres métamériques permettant l'apparition d'une image cachée à incidence oblique et la détection par laser d'un signal encodé. Les articles [1, 2] mentionnent l'utilisation de filtres métamériques .
E	Filtre métamérique et polymère - Simple changement de couleur.	Utilisation d'un filtre métamérique avec du Kapton [®] . Permet également l'apparition d'une image cachée à incidence oblique. Moins sensible aux changements d'illuminants et aux erreurs de déposition que le design D.
F	Filtre métamérique et polymère - Simple changement de couleur.	Comme le design E, mais offre un changement de couleur plus impressionnant.
G	Filtre métal-diélectrique - Triple changements de couleur.	Observation d'un phénomène surprenant, soit une couleur en transmission indépendante du côté d'observation et deux couleurs différentes en réflexion selon le côté d'observation.
H	Filtre métal-diélectrique - Triple changements de couleur.	Comme le design G, mais avec un nombre de couches beaucoup plus faible.

4.2.1 VARIATION DE COULEUR SIMPLE - DESIGN A

Commençons tout d'abord par les filtres les plus simples affichant un changement de couleur classique. Tel que nous l'avons vu précédemment, un filtre de type quart d'onde est la façon la plus directe afin d'obtenir une couleur spécifique. Par exemple, afin d'obtenir une variation de couleur allant du rouge au jaune, il s'agit tout simplement de choisir la longueur d'onde quart d'onde de sorte que le maximum en réflexion soit dans la région entre 600 et 780 nm. On obtient ainsi un filtre laissant passer les hautes fréquences (passe-haut). Évidemment, dans le but d'atteindre une couleur spécifique, une optimisation doit être faite à l'aide d'un logiciel de design.

Les épaisseurs de chacune des couches du design ainsi que celles de tous les designs qui seront présentés sont données en annexe. La figure 4.2 présente, quant à elle, le spectre en transmission du design et du filtre A. On remarque un léger décalage du spectre expérimental vers les courtes longueurs d'onde. Ceci nous indique que l'épaisseur des couches est inférieure à ce qui était prévu. Les taux de dépôt calculés sont probablement légèrement surestimés. Malgré tout, la différence obtenue n'affecte que très peu l'objectif de ce design, soit obtenir un changement de couleur du rouge au jaune. La figure 4.3 présente le parcours colorimétrique obtenu dans l'espace xy lorsque l'angle d'observation est augmenté. On note une variation allant du rouge, à l'orange et finalement au jaune en réflexion. Pour ce qui est de la transmission, le changement se fait selon les couleurs complémentaires du rouge, de l'orange et du jaune. En effet, tel que vu dans la théorie, lorsque l'on trace une ligne allant de l'illuminant D65 à une couleur spécifique, le prolongement passe toujours par la couleur complémentaire. C'est ce que l'on observe dans ce cas-ci entre les couleurs en réflexion et en transmission. Ceci sera toujours valable pour tous les filtres diélectriques déposés, conséquence de l'absence d'absorption. Le changement en transmission affiché est donc un cycle passant du bleu ciel, à un bleu plus foncé et finalement au violet. Il est à noter que les couleurs sont également affichées à droite de la figure afin de donner un meilleur aperçu. Par contre, il est évident que ces couleurs ayant tout d'abord été converties au modèle *RGB* et finalement lors de l'impression au modèle *CMYK*, ne sont qu'une représentation approximative de la réalité.

Nous venons donc de voir qu'il est relativement simple de fabriquer un filtre affichant une variation de couleur. Il serait tout aussi simple de faire un filtre allant du vert au bleu et au violet, tout simplement en variant l'épaisseur des couches quart d'onde. Les prochains designs offrent des caractéristiques supplémentaires afin de les rendre plus complexes.

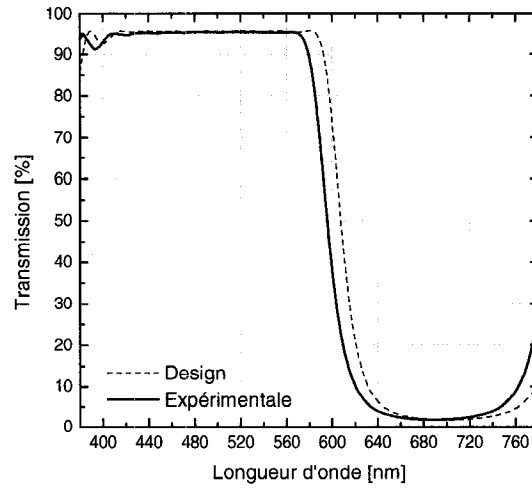


Figure 4.2: Transmission en fonction de la longueur d'onde à incidence normale pour le design A.

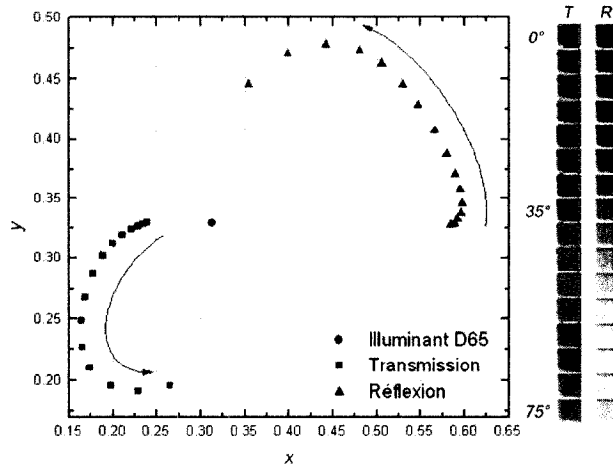


Figure 4.3: Variation de la couleur en transmission (mesurée par spectrophotométrie) et en réflexion sous l'illuminant D65 de 0° à 75° par sauts de 5° pour le design A.

4.2.2 TRIPLE CHANGEMENTS DE COULEUR - DESIGN B

Le design A ne présentait qu'un seul changement de couleur en fonction de l'angle d'observation. Toute image qui serait conçue avec ce filtre serait donc monochrome. Afin d'accroître l'esthétique d'un dispositif de sécurité, il serait intéressant d'avoir accès à plus d'une couleur. Une façon simple de le faire, est de déposer un filtre différent sur chacune des faces d'un substrat de verre. Bien entendu, ce concept ne fonctionnerait que pour un dispositif utilisé en transmission. Le concept de base est donc simple, soit concevoir deux filtres différents et les combiner afin d'obtenir un changement de couleur intéressant. On obtient ainsi, selon le motif qui est créé, trois couleurs différentes, soit les couleurs individuelles des deux filtres et celle obtenue par leur combinaison. Le design B est donc composé de la superposition d'un filtre passe-bas et passe-haut dont les longueurs d'onde de coupure sont différentes, laissant ainsi une région où la lumière peut être transmise.

La figure 4.4 présente la transmission du filtre passe-haut qui a été déposé. On remarque que cette fois-ci, la correspondance des spectres théorique et expérimentale est très bonne. Une fois le filtre passe-haut déposé, le substrat a été changé de côté et le filtre passe-bas ensuite lui aussi été déposé. L'effet combiné du filtre passe-bas et passe-haut est présenté à la figure suivante (voir figure 4.5). On aperçoit clairement les deux bandes de coupure des filtres en question. Le résultat final offre un changement de couleur qui est présenté à la figure 4.6. Il serait donc possible, en gravant l'un des deux filtres ou les deux complètement, d'obtenir une couleur verte, bleue, rouge ou incolore en transmission ainsi que les changements de couleur respectifs de chacun des filtres.

Il est par contre important de noter que ce type de dispositif serait coûteux à produire sans compter que malgré sa complexité apparente, il n'est qu'une simple variation du design précédent. Ceci nous mène ainsi à tenter de créer un dispositif encore plus complexe.

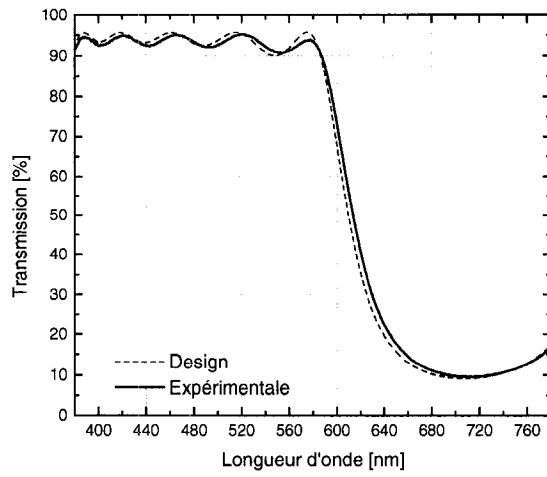


Figure 4.4: Transmission en fonction de la longueur d'onde à incidence normale pour le filtre passe-haut du design B.

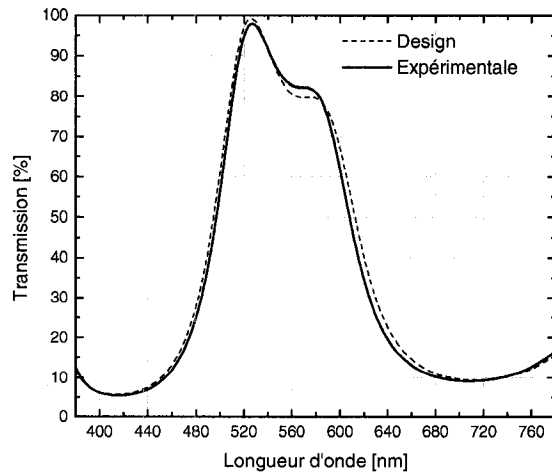


Figure 4.5: Transmission en fonction de la longueur d'onde à incidence normale pour le design B.

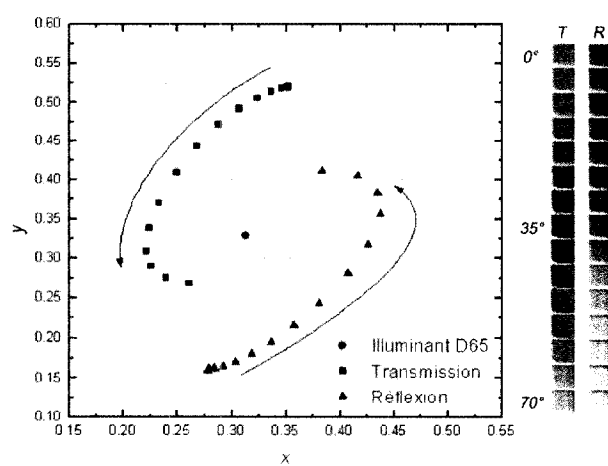


Figure 4.6: Variation de la couleur en transmission (mesurée par spectrophotométrie) et en réflexion sous l'illuminant D65 de 0° à 70° par sauts de 5° pour le design B.

4.2.3 CHANGEMENT DE COULEUR INVERSÉ - DESIGN C

Les filtres précédents présentaient tous des changements de couleur que l'on peut qualifier de classiques, c'est-à-dire que les changements se font de façon prévisible. Le jaune suit l'orange qui lui suit le rouge par exemple. Il est par contre possible de créer ce que l'on nomme des filtres à variation de couleur inversée. Comme nous l'avons vu dans la partie théorique (page 46), le spectre de tous les filtres interférentiels se déplace vers les courtes longueurs d'onde. On peut donc s'imaginer un filtre ayant une bande dans la partie bleue du spectre du visible et l'une dans le proche infrarouge. Ainsi, lorsque l'angle d'incidence augmentera, la bande dans la partie bleue se retrouvera dans l'ultraviolet et celle dans le proche infrarouge dans la partie rouge du spectre. Il existe un type de filtre qui se rapproche énormément à ce que nous venons de voir. En effet, les filtres Fabry-Pérot possèdent une bande très large sans transmission. Ce type de filtre est donc à la base du design que je présente dans cette section.

Analysons les épaisseurs obtenues pour ce modèle (B.3 en annexe). L'épaisseur moyenne des couches de Ta_2O_5 , excluant ce que l'on peut considérer être la couche demi-onde, est de 55,4 nm. Le pic de transmission se trouvant à 502 nm, l'épaisseur théorique d'une couche quart d'onde est de 58,2 nm ce qui est très proche du présent modèle. L'écart pour la couche de SiO_2 est légèrement plus grand avec une épaisseur moyenne de 97,8 nm et une valeur théorique de 84,2 nm. La forme du spectre obtenu (voir figure 4.7) est donc prévisible. Notons que dans ce cas-ci, le spectre expérimental est très proche de la prédiction du modèle, nous indiquant que les taux de dépôt utilisés étaient valides.

Observons maintenant la variation de couleur de ce filtre (voir figure 4.8). On note que la couleur passe d'un violet à un rose pour finalement se terminer par un jaune beige. Ceci n'est donc pas tout à fait ce que nous avons voulu obtenir en théorie, mais un nombre de couches raisonnable oblige de faire des compromis. Tout de même, on remarque que le parcours colorimétrique en transmission est relativement long, permettant un effet très marqué. Cette divergence du modèle théorique s'explique par l'impossibilité de maintenir la bande responsable de la coloration rouge dans le proche infrarouge à incidence normale. Ainsi, la couleur initiale est plutôt violet. De plus, il est important de savoir que l'étroitesse du pic à 502 nm limite son effet sur la coloration de l'échantillon.

Ce type de filtre offre probablement ce qu'il y a de mieux au niveau d'un changement de couleur impressionnant et très visible. Les designs qui suivent, en plus d'afficher un changement de couleur, possèdent tous une caractéristique supplémentaire.

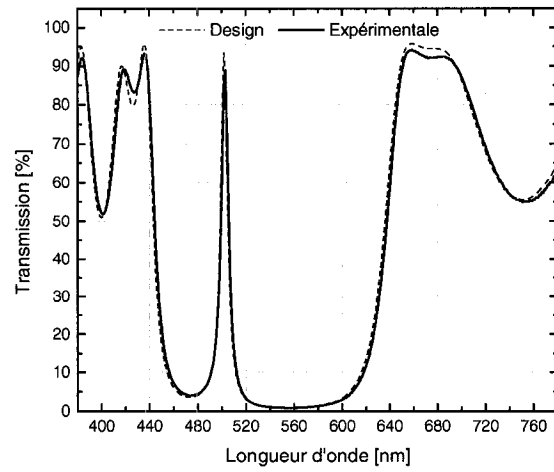


Figure 4.7: Transmission en fonction de la longueur d'onde à incidence normale pour le design C.

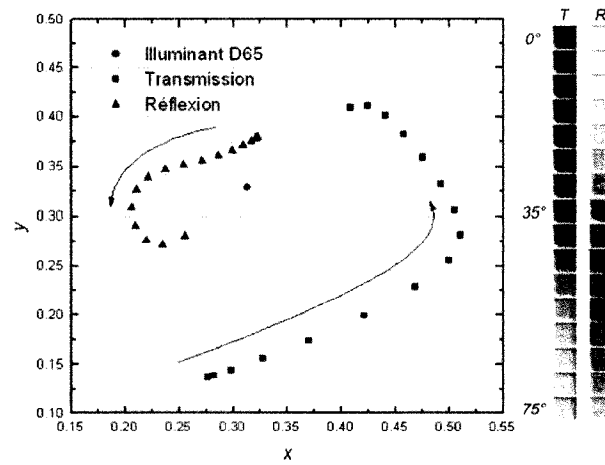


Figure 4.8: Variation de la couleur en transmission (mesurée par spectrophotométrie) et en réflexion sous l'illuminant D65 de 0° à 75° par sauts de 5° pour le design C.

4.2.4 FILTRES MÉTAMÉRIQUES - DESIGN D

Dans la partie théorique, une emphase toute particulière a été mise sur le phénomène de métamérisme. Les trois designs qui suivent sont ainsi basés sur ce principe colorimétrique très important. L'objectif initial était de créer deux filtres possédant la même couleur en transmission et en réflexion à incidence normale, mais ayant des spectres tout-à-fait différents. Le design D est ainsi le fruit de ce travail. De plus, non seulement ai-je fait mon design en tentant d'obtenir les mêmes couleurs, mais j'ai également ajouté une caractéristique spectrale propre à chacun des deux filtres.

Mes objectifs peuvent donc se définir comme suit :

- Que les deux filtres soient métamériques à incidence normale.
- Que leur couleur initiale soit attrayante.
- Que leur parcours de couleur en fonction de l'angle d'observation soit différent.
- Que l'un des deux filtres possède une réflexion élevée à 632,8 nm, soit la longueur d'onde d'un laser HeNe auquel j'avais facilement accès et que l'autre possède, quant à lui, une réflexion très faible.

La façon logique de procéder était donc de commencer par générer le filtre le plus complexe, soit celui avec un pic de réflexion à 632,8 nm et de choisir une couleur initiale. Il va s'en dire que j'ai dû faire plusieurs modèles avant d'obtenir un filtre possédant ces caractéristiques et pour lequel il était possible de faire un filtre métamérique avec un nombre de couches raisonnables. La figure 4.9 présente le premier filtre obtenu. On remarque qu'il possède effectivement un maximum en réflexion à 632,8 nm, soit une valeur de 95,77%. La couleur obtenue, qui est difficilement imaginable en observant seulement le spectre, est un vert dont les coordonnées xyY sont les suivantes : (0.302, 0.462, 46.127). La seconde partie du travail consistait donc à générer un deuxième filtre possédant les mêmes coordonnées xyY sous l'illuminant D65, en plus d'avoir une valeur en réflexion inférieure à 5% à 632,8 nm. L'illuminant D65 a été utilisé puisque celui-ci est généralement utilisé lors d'applications métamériques. Le résultat est un filtre possédant un nombre de couches inférieures et pour lequel les caractéristiques désirées ont été atteintes (voir figure 4.10). On note en effet que la réflexion est de 5,11%. Pour ce filtre-ci, les coordonnées xyY obtenues sont les suivantes : (0.302, 0.461, 46.112), valeurs suffisamment proches pour que nos yeux soient incapables de noter de différence.

La différence en réflexion à 632,8 nm a été insérée afin d'ajouter un moyen de vérification de second niveau à travers l'utilisation d'un détecteur et d'un laser HeNe. En effet, la création d'un motif basé sur les filtres A et B permettrait d'obtenir une signature particulière, tel

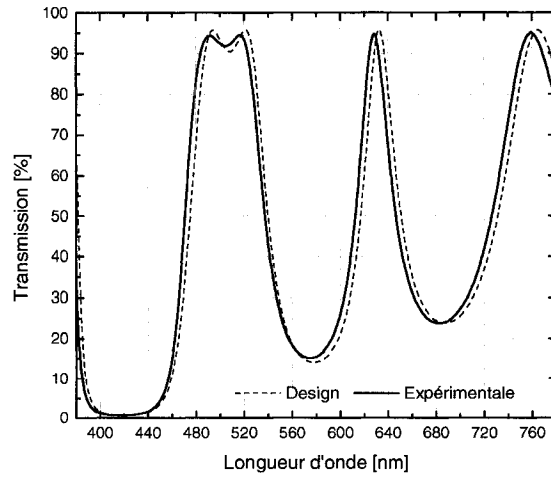


Figure 4.9: Transmission en fonction de la longueur d'onde à incidence normale pour le design D - filtre A.

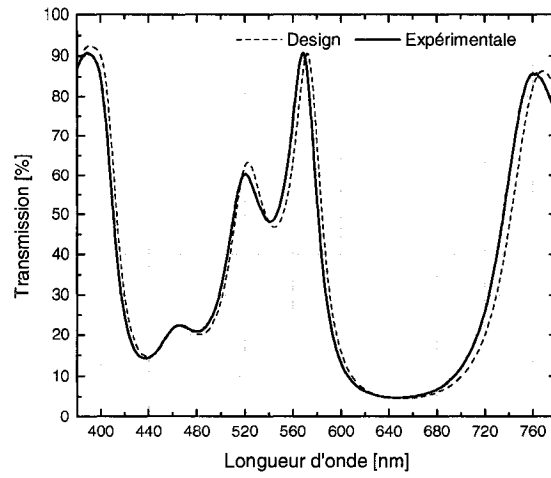


Figure 4.10: Transmission en fonction de la longueur d'onde à incidence normale pour le design D - filtre B.

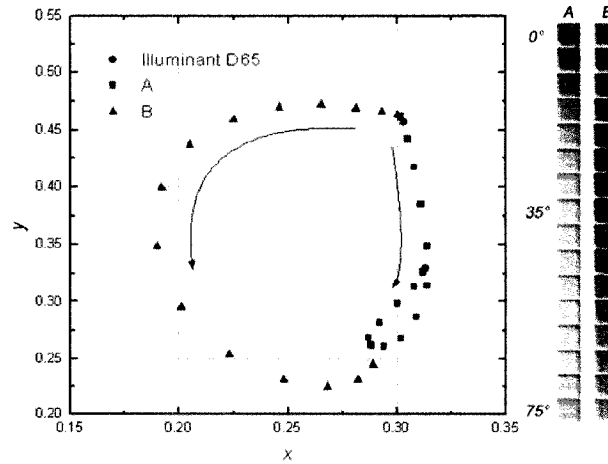


Figure 4.11: Variation de la couleur en transmission (mesurée par spectrophotométrie) sous l'illuminant D65 de 0° à 75° par sauts de 5° pour les filtres A et B du design D.

un code barre, qui serait facile à lire dans un lecteur de billets automatique conventionnel.

La création d'un motif avec ces deux filtres permettrait également de créer un phénomène d'image cachée. À incidence normale, aucune différence ne pourrait être observée, mais à mesure que le dispositif serait incliné, étant donné les parcours colorimétriques différents, une image apparaîtrait, offrant ainsi un élément de surprise très intéressant.

Ayant maintenant énoncé le concept de ce design, penchons-nous sur sa réalisation. Sur les figures 4.9 et 4.10, on peut également apercevoir les spectres en transmission obtenus expérimentalement pour les deux filtres en question. Encore une fois, on note un bon accord entre le design et l'expérimentation, malgré un léger décalage vers les courtes longueurs d'onde. La variation de couleur offerte par ces deux filtres est présentée à la figure 4.11. Le filtre A passe d'une couleur verte, à mauve et finalement grise tandis que le filtre B passe du vert au bleu et finalement le mauve. Nous verrons, dans la section qui suit, l'effet qu'une légère variation des épaisseurs des couches peut avoir au niveau de la couleur finale, mais avant cela, l'analyse du comportement du design sous différentes conditions d'illumination est présentée.

4.2.4.1 ANALYSE COLORIMÉTRIQUE

Le design D est bel et bien métamérique sous l'illuminant D65, mais quant est-il pour les autres sources d'illumination ? Le tableau 4.7 présente les valeurs de l'indice de métamé-

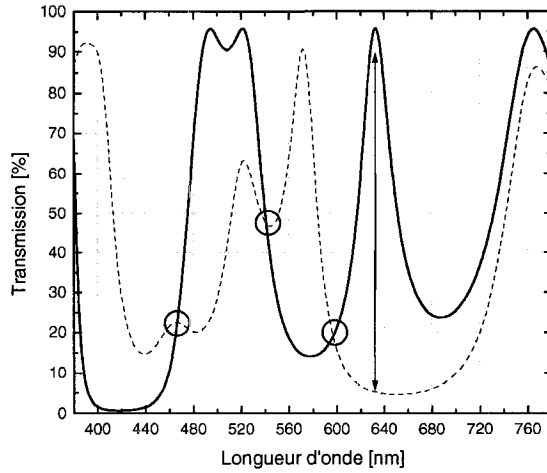


Figure 4.12: Comparaison des deux spectres en transmission des filtres métamériques A et B à incidence normale.

risme selon les équations CIELAB, CIE94 et CIE2000. Les deux derniers modèles ne sont utilisés que pour la condition de référence, soit l'illuminant D65. Notons tout d'abord les valeurs obtenues avec l'équation CIELAB pour les illuminants D65, C, A et F1 entre les filtres A et B théoriques. On note que, pour l'illuminant D65, la valeur est inférieure à 1, valeur que nous avons considérée comme étant le seuil de discrimination (voir théorie). Pour l'illuminant C, elle est également très faible, cet illuminant étant très similaire au précédent. Par contre, pour les illuminants A et F1, les filtres ne sont clairement plus métamériques. Ceci était prévisible, puisque les courbes en transmission de A et B sont très différentes et ne possèdent que trois points d'intersections (voir figure 4.12), le minimum afin que le métamérisme soit possible. Le phénomène d'image cachée ne serait valable dans ce cas-ci que pour des conditions très particulières. Il existe tout de même une solution à ce problème. En effet, le design de deux filtres ayant exactement les mêmes spectres en transmission, mais dont le parcours colorimétrique en fonction de l'angle d'observation est différent serait le cas idéal. Inutile de dire que ce type de filtres soit extrêmement complexe à créer. Nous traiterons ce problème d'une façon plus simple lors des prochains designs. D'un autre côté, cette susceptibilité à la source d'illumination pourrait être utilisée à notre avantage en tant qu'élément de vérification.

Il est intéressant de noter que les modèles CIE94 et CIE2000 donnent des valeurs toujours inférieures au modèle CIELAB et que leurs valeurs respectives sont généralement très proches. Le tableau 4.7 présente également les différences de couleur obtenues entre les filtres

Tableau 4.7: Calculs de différence de couleur pour les filtres A et B du design D. * Note : Ces valeurs ne sont présentées qu'à des fins de comparaison puisqu'elles sont calculées pour des conditions hors référence (CIELAB > 5).

Illuminants	<i>CIELAB</i>	<i>CIE94</i>	<i>CIE2000</i>
Différence entre le filtre A et le filtre B			
D65	0,27	0,07	0,09
C	1,30	-	-
A	38,98	-	-
F1	14,40	-	-
Différence entre le filtre A déposé et le filtre B déposé			
D65	15,51	4,57*	4,64*
C	16,45	-	-
A	50,95	-	-
F1	14,76	-	-
Différence entre le filtre A et le filtre A déposé			
D65	11,49	3,23*	3,49*
C	11,06	-	-
A	8,73	-	-
F1	11,85	-	-
Différence entre le filtre B et le filtre B déposé			
D65	4,88	1,19	1,63
C	4,89	-	-
A	4,68	-	-
F1	5,46	-	-

déposés et leur design respectif. Malgré un décalage qui semble pratiquement le même dans le cas des deux dépôts, on remarque que la couleur du filtre A est beaucoup plus éloignée de sa valeur prévue. Celui-ci est donc plus sensible aux erreurs de déposition. Ces erreurs de déposition font en sorte que le résultat final, soit la différence entre les filtres A et B déposés, est suffisante pour qu'il n'y ait pas de métamérisme. La valeur CIELAB obtenue est de 15,51 pour l'illuminant D65. Ceci est également confirmé lorsque l'on observe les deux filtres à l'oeil nu. Fait intéressant à noter, les modèles CIE94 et CIE2000 offrent une meilleure évaluation de la différence de couleur, par contre, les valeurs de seuil de détection ne sont pas les mêmes que pour le modèle CIELAB. Pour le modèle CIE94, puisque celui-ci n'est pas valable pour des valeurs de CIELAB supérieures à 5, nous ne l'utiliserons pas pour faire des analyses de variation de couleur en fonction de l'erreur sur le taux de déposition. Pour le modèle CIE2000, il semblerait, par expérience, qu'une valeur autour de 0,55 soit plus proche du seuil de détection. Ceci nous indique que l'évaluation de la différence de couleur entre deux objets n'est jamais évidente. En effet, elle dépend de tellement de facteurs que la meilleure façon de déterminer un seuil de détection est d'avoir un échantillonnage d'objets présentant différentes couleurs et d'évaluer sous des conditions d'éclairage précises par rapport à un standard s'il est possible de les différencier. Ensuite, en comparant les coordonnées colorimétriques, une valeur plus précise du seuil peut être obtenue. Par contre, dans mon cas, puisqu'il serait insensé de déposer des dizaines de filtres, nous fixerons la valeur de CIELAB à 1 ainsi que celle de CIE2000 pour des fins de comparaison.

Afin de voir l'effet que peut avoir une légère erreur d'évaluation du taux de dépôt, un logiciel de simulation a été utilisé afin de générer 441 filtres dont l'erreur sur chacune des couches a été variée d'une valeur allant de 99% à 101% et ce, pour les couches de SiO_2 et de Ta_2O_5 respectivement. Cette méthode de génération d'erreur présuppose que le taux de dépôt du DIBS est constant dans le temps et que l'erreur sur les couches n'est pas aléatoire. Ceci a été vérifié par la déposition du même filtre à deux reprises et en comparant les spectres de transmission obtenus. Les figures 4.13 et 4.14 présentent l'indice de métamérisme CIELAB entre le filtre généré et le design en fonction des erreurs sur le taux de déposition pour les filtres A et B. Les mêmes figures, mais présentant les résultats avec le modèle CIE2000, sont présentées en annexe. On remarque tout d'abord, tel que nous l'avions mentionné précédemment, que le filtre A est plus sensible aux erreurs de déposition, sa région ayant une valeur inférieure à 1 étant plus petite que celle du filtre B. L'un des éléments contribuant à cette sensibilité étant entre autres son nombre de couches plus élevé.

Un autre élément intéressant à noter est le phénomène de compensation qui s'exprime

par le fait qu'il est tout de même possible d'obtenir un filtre de la bonne couleur même si chaque couche de SiO_2 est 1% trop mince ou trop épaisse en augmentant ou en diminuant l'épaisseur des couches de Ta_2O_5 . Ceci pourrait probablement devenir un outil de monitoring intéressant. Sur les 441 filtres, seulement 49 possèdent une valeur inférieure à 1, soit environ 11,1% des filtres générés. Un taux d'erreur de 1% n'est donc pas suffisant afin d'obtenir un bon rendement. Ce pourcentage augmente à 23,9% pour une résolution de 0,5%, 38,8% pour 0,3% et 78,7% pour 0,1%. On note ainsi que afin d'obtenir une production suffisante, la précision sur le taux de dépôt doit être extrêmement élevée dans le cas du filtre A.

Pour ce qui est du filtre B, 89 filtres sur les 441 possèdent une valeur inférieure à 1, ce qui donne un taux de 18,4% pour une résolution de 1%. Ceci confirme que le filtre B est plus facile à déposer. Le pourcentage d'acceptation augmente à 37,2% pour une résolution de 0,5%, 59,2 % pour 0,3% et 100% pour 0,1%. Les critères de monitoring de l'épaisseur sont donc moins élevés dans ce cas-ci.

Maintenant, si l'on compare les filtres A et B entre eux (voir figure 4.15), il est évident que les chances qu'ils soient métamériques sont encore plus faibles. En fait, 5,7% des combinaisons seront métamériques (25 des 441 filtres). Même avec un contrôle à 0,1% seulement 55,6% des filtres seront métamériques. Il n'est donc pas surprenant que mes filtres ne soient pas métamériques entre eux. En effet, 0,1% sur une couche de 50 nm représente 0,5 Å !

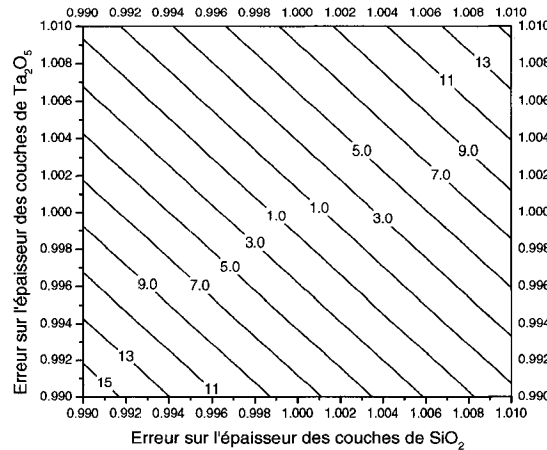


Figure 4.13: Variation de la couleur (*CIELAB*) en fonction de l'erreur sur l'épaisseur des couches pour le filtre D - Partie A.

Les deux dernières figures nous permettent également d'avoir une idée approximative de la résolution que notre monitoring par le temps nous offre. En effet, la valeur expérimentale

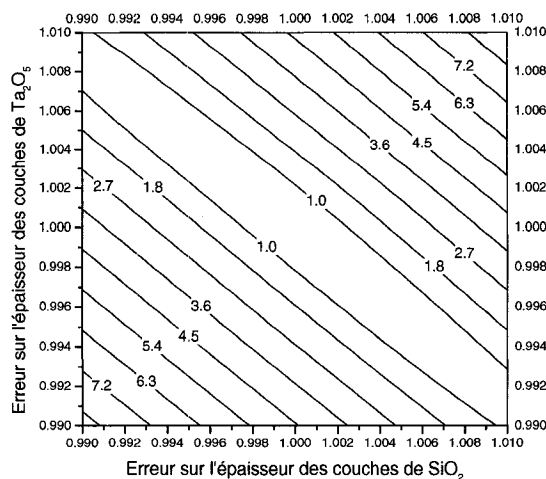


Figure 4.14: Variation de la couleur (*CIELAB*) en fonction de l'erreur sur l'épaisseur des couches pour le filtre D - Partie B.

de différence de couleur obtenue est de 11,49 pour le filtre A et de 4,88 pour le filtre B. Pour le filtre A, puisque son spectre en transmission est décalé vers la gauche, on en conclut que les couches ne sont pas suffisamment épaisses et que l'erreur sur le taux de dépôt se situe sur la droite allant de 0,995 pour le Ta_2O_5 et 0,995 pour le SiO_2 . Si on fait la supposition que l'erreur sur les deux couches est la même, on trouve une valeur d'environ 99,25% du taux idéal. Une couche de 50 nm aura ainsi une erreur de 3,75 Å, valeur très raisonnable considérant la méthode de monitoring. De même, pour le filtre B, on trouve une valeur de 99,45%, soit légèrement meilleure que pour le filtre A. Il est intéressant de noter que les figures C.1 et C.2 fournissent à toute fin pratique les mêmes résultats.

Que pouvons nous donc conclure suite à cette analyse colorimétrique ? Premièrement, ce type de dispositif est extrêmement difficile à déposer. La complexité est certes un élément important lors de la fabrication d'un dispositif de sécurité, mais dans ce cas-ci, cette complexité s'applique également pour le fabricant. En effet, le contrôle nécessaire afin de déposer une paire de filtres métamériques est très élevé et le faible jeu qui est disponible ne laisse place qu'à très peu de marge de manoeuvre. Ceci dit, les coûts de production seraient probablement beaucoup trop élevés. Sans compter que l'utilisation de deux filtres, ce qui donne dans ce cas-ci 34 couches, serait beaucoup trop coûteuse également. Ceci m'a donc poussé à penser à une alternative et ainsi tenter d'appliquer le métamérisme différemment. On peut tout de même s'imaginer designer deux filtres métamériques partageant un certain

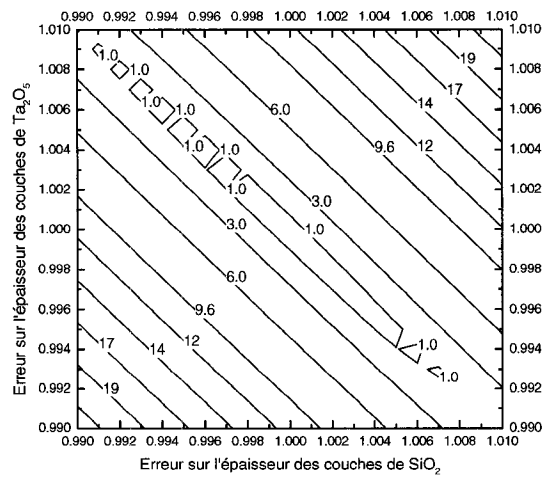


Figure 4.15: Variation de la couleur (*CIELAB*) en fonction de l'erreur sur l'épaisseur des couches pour le filtre D - Partie A et B.

nombre de leurs premières couches en commun, ce qui permettrait de simplifier le processus de fabrication.

4.2.5 FILTRES MÉTAMÉRIQUES-POLYMÈRES

Face aux problèmes que nous avons identifiés précédemment avec le design D, une nouvelle approche a été apportée au concept du métamérisme. Au lieu de déposer deux filtres métamériques, pourquoi ne pas ajuster la couleur d'un filtre à la couleur d'un matériel non iridescent. De cette façon, il est toujours possible d'incorporer une composante spectrale différente au filtre et son changement de couleur, qui sera absent pour le matériau non iridescent, permettra tout de même la création d'un phénomène d'image cachée. Mais encore plus important, le spectre du filtre pouvant être pratiquement identique à celui du matériau choisi, les probabilités qu'ils soient métamériques sous plusieurs sources d'illumination seront très élevées. On peut également s'attendre à ce que les chances qu'il y ait métamérisme soient plus élevées puisque l'un des deux «objets» dont la couleur doit être reproduite est invariable, ce qui n'était pas le cas du design D.

La première étape était donc de trouver le matériau non iridescent que j'allais utiliser. Puisque les filtres ont une apparence très métallique en réflexion, l'utilisation d'une encre métallique ou d'une couche de métal colorée pourrait être envisageable, mais dans mon cas difficile à obtenir. Je me suis donc penché plus en détail sur un dispositif qui serait utilisé en transmission.

Un jour que je sortais du laboratoire, je suis tombé sur un morceau de Kapton[®] (Du Pont), polymère dont la couleur est jaunâtre. C'est de là que l'idée m'est venue de tenter de reproduire la couleur de ce polymère avec un filtre interférentiel. La première étape consiste évidemment à obtenir le spectre en transmission du matériau en question. Une fois celui-ci obtenu, ses coordonnées colorimétriques peuvent être obtenues sous toutes les sources d'illumination voulues. L'étape suivante est donc de choisir sous quel type d'illuminant l'on désire que notre filtre soit métamérique. Dans ce cas-ci, suite aux résultats du design D, j'ai ajouté l'illuminant F1 à l'illuminant D65 puisque mon bureau est éclairé par des fluorescents.

4.2.5.1 DESIGN E

Observons tout d'abord le spectre en transmission du Kapton[®] (voir figure 4.16). On note que celui-ci possède un profil relativement simple et que ce dernier ressemble grandement à celui d'un filtre passe-bas. Immédiatement, le modèle d'un filtre quart d'onde nous vient à l'esprit. Le modèle initial fut donc un filtre quart d'onde à 450 nm. Pour une raison qui m'échappe, une couche de SiO₂ s'est insérée au début du filtre, couche qui n'a pratiquement aucun effet sur le design final étant donné le peu de contraste optique entre

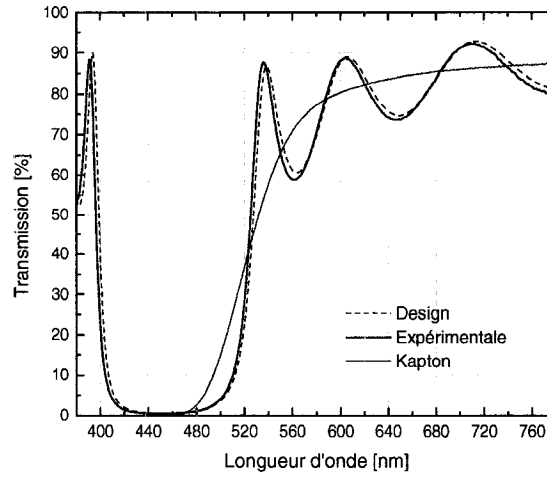


Figure 4.16: Transmission (incidence normale) en fonction de la longueur d'onde pour le filtre F et le Kapton®.

celle-ci et le substrat. Les épaisseurs théoriques des quart d'onde de SiO_2 et de Ta_2O_5 sont dans ce cas-ci respectivement, 74,95 nm et 51,21 nm. La valeur moyenne des épaisseurs des couches de SiO_2 et de Ta_2O_5 pour ce filtre sont de 76,26 nm et 50,91 nm, ce qui se rapproche grandement de nos valeurs théoriques. Elles sont différentes pour la simple raison que le modèle a été optimisé afin que la couleur obtenue par celui-ci soit identique à celle du Kapton® sous les illuminants D65 et F1. Il est également important à noter que pour ce filtre, les propriétés optiques utilisées ont été changées. Les nouvelles valeurs des coefficients de Cauchy pour le SiO_2 sont (1,4826, 3,5905e-3, 3,0407e-5) et pour le Ta_2O_5 (2,0704, 1,8056e-2, 1,5353e-3).

La table 4.8 présente les calculs de différences de couleur pour le design E et le Kapton®. On remarque que pour les illuminants D65, C et F1, la valeur est sous la barre critique que nous nous sommes fixée. Dans le cas de l'illuminant A, elle est de 4,54, valeur qui est tout de même relativement faible. Tel que prévu, le filtre est métamérique sous plusieurs illuminants, conséquence directe du fait qu'il existe dans ce cas-ci, sept intersections entre le spectre du filtre et celui du Kapton®.

Observons maintenant les résultats obtenus pour le filtre déposé. On remarque qu'il y a une très bonne correspondance entre le design et les résultats expérimentaux suite à une optimisation des propriétés optiques et du taux de dépôt. Ceci dit, les valeurs de différences de couleur obtenues sont légèrement supérieures, mais pour le cas de l'illuminant F1, restent tout de même très proche de 1. On peut remarquer que l'effet est particulièrement bien réussi

Tableau 4.8: Calculs de différence de couleur pour le filtre E.

Illuminants	CIELAB	CIE94	CIE2000
Différence entre le Kapton [®] et le design			
D65	0,35	0,06	0,06
C	0,34	-	-
A	4,54	-	-
F1	0,46	-	-
Différence entre le design et le filtre déposé			
D65	2,31	0,31	1,08
C	2,00	-	-
A	1,47	-	-
F1	1,02	-	-
Différence entre le Kapton [®] et le filtre déposé			
D65	2,19	0,30	1,07
C	1,84	-	-
A	4,34	-	-
F1	1,25	-	-

en observant la figure 4.18, qui présente une photo du filtre ainsi que de deux morceaux de Kapton[®]. Il est effectivement très difficile de différencier lequel des trois est le filtre. La différence devient par contre évidente si l'ensemble du dispositif est observé en réflexion puisque l'on voit ainsi la couleur complémentaire du filtre, soit le bleu.

J'ajoute que la variation de couleur du filtre n'est pas présentée dans ce cas-ci puisque celle-ci est très faible. En effet, le filtre passe d'une couleur jaune à jaune pâle. Ceci est tout simplement dû aux contraintes du spectre en transmission du Kapton[®] que j'ai tenté de suivre le plus possible. Par contre, on peut noter une nette différence en transmission à 395 nm (0% de transmission pour le Kapton[®] et 95% pour le filtre), qui pourrait être utilisée à des fins de détection automatique.

L'analyse qui a été faite en fonction de l'erreur sur le taux de déposition a également été faite pour le cas du design E. La figure 4.17 présente les résultats dans l'espace $L^*a^*b^*$ (Les résultats dans l'espace CIE2000 sont présentés en annexe, figure C.3). On remarque sur cette figure que ce filtre n'est pas très sensible aux variations d'épaisseur, entre autres par la largeur de la région inférieure à 1 et également par les faibles valeurs obtenues pour

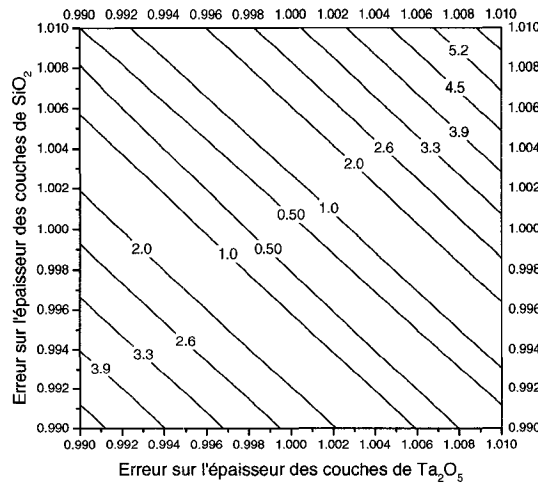


Figure 4.17: Variation de la couleur (*CIELAB*) en fonction de l'erreur sur l'épaisseur des couches pour le design E.

les erreurs maximales. De plus, 136 des 441 filtres possèdent une valeur inférieure à 1, soit 30,8% des filtres. On obtient des valeurs de 52,9% pour 0,5%, 73,5% pour 0,3% et 100% pour 0,1% d'erreur sur le taux de déposition. Ceci joue évidemment à notre avantage et explique la raison pour laquelle nous avons obtenu un si bon résultat, tel que montré à la figure 4.18. Pour le filtre déposé, selon les mêmes suppositions que précédemment, on trouve une valeur d'environ 99,7%, valeur qui est très encourageante considérant que pour une couche de 50 nm, ceci représente une erreur de 1,5 Å.

Nous avons donc modifié le concept de filtre métamérique présenté lors du design D. En effet, le design E est maintenant beaucoup plus simple à déposer. Sans compter qu'il est métamérique sous plusieurs illuminants et que celui-ci serait moins coûteux à produire étant donné son nombre de couche inférieur et sa faible sensibilité aux erreurs de dépôt. Par contre, la variation de couleur offerte par le design E est décevante. La couleur jaune initiale n'offre que très peu de variations. La solution à apporter consistait donc à trouver des échantillons de polymère ayant d'autres couleurs qui me permettrait ainsi de faire des designs plus attrayants. La solution s'est présentée lorsque je suis tombé sur des échantillons de gel qui sont utilisés afin de contrôler l'éclairage lors des pièces de théâtre. Il en existe une gamme complète et les spectres en transmission sont également fournis. Le design F présente les résultats obtenus pour un polymère de couleur orangée (*Gam Color - Coral 335*).

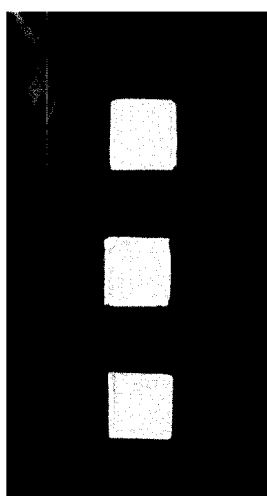


Figure 4.18: Photo prise du design E et de deux morceaux de Kapton[®]. Pouvez-vous deviner lequel est le filtre ?

4.2.5.2 DESIGN F

Afin d'améliorer le changement de couleur du dispositif final, j'ai donc utilisé un polymère dont la couleur est orangé. Le spectre en transmission de ce gel est affiché à la figure 4.19. Fait intéressant, étant donné la faible épaisseur du gel, on peut observer des franges d'interférence pour des longueurs d'onde supérieures à 600 nm. Cette fois-ci, le spectre obtenu est légèrement plus complexe, mais j'ai tout de même procédé de la même façon qu'avec le design E. Cette fois-ci, le filtre en question a été optimisé pour l'illuminant D65. On note, au tableau 4.9, la valeur de CIELAB inférieure à 1 pour les illuminants D65 et C, ainsi qu'une valeur faible pour les illuminants A et F1.

Encore une fois, le spectre expérimental est très proche du spectre théorique. Autre fait intéressant, étant donné les erreurs de déposition, le filtre se trouve à être métamérique avec le polymère sous l'illuminant F1. Ceci est confirmé visuellement par l'impossibilité de distinguer le filtre du polymère dans mon bureau.

La variation de couleur obtenue est également beaucoup plus intéressante et est affichée à la figure 4.20. Celle-ci va de l'orange vers le jaune et finalement le blanc.

Nous avons donc tous les éléments nécessaires afin de créer un dispositif métamérique efficace et visuellement très intéressant. L'étape suivante serait de créer un motif à base du polymère et du filtre afin de créer un image. Nous verrons plus tard comment la création de motif a été effectuée dans le cadre de mon projet. Néanmoins, il reste encore quelques problèmes à résoudre, entre autres, comment créer une image avec le polymère autre que de le découper et de le coller, ce qui modifierait sa transmission. Le mieux serait de trouver une façon de rendre le polymère incolore de façon sélective à certains endroits. De plus, afin de limiter les problèmes de variation de couleur liés aux erreurs de déposition, la BdC m'a donné une idée, soit de faire en sorte que le filtre soit métamérique avec le polymère, mais à un angle autre qu'à incidence normale. Ainsi, même si la couleur initiale n'est pas parfaite, les chances que le phénomène de métamérisme apparaisse à un angle autour de l'angle prévu sont plus probables. Je considère par contre cet effet comme étant moins impressionnant.

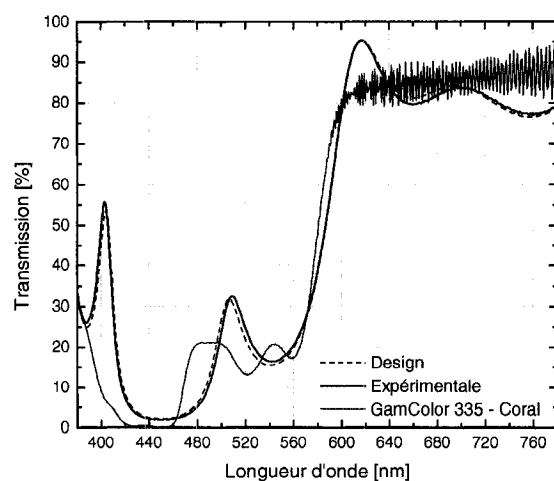


Figure 4.19: Transmission (incidence normale) en fonction de la longueur d'onde pour le filtre F et un gel coloré.

Tableau 4.9: Calculs de différence de couleur pour le filtre F.

Illuminants	CIELAB	CIE94	CIE2000
Différence entre le polymère et le design			
D65	0,29	0,04	0,14
C	0,46	-	-
A	3,19	-	-
F1	3,02	-	-
Différence entre le design et le filtre déposé			
D65	3,36	0,55	1,77
C	3,34	-	-
A	2,83	-	-
F1	3,21	-	-
Différence entre le polymère et le filtre déposé			
D65	3,08	0,52	1,63
C	3,12	-	-
A	5,46	-	-
F1	0,70	-	-

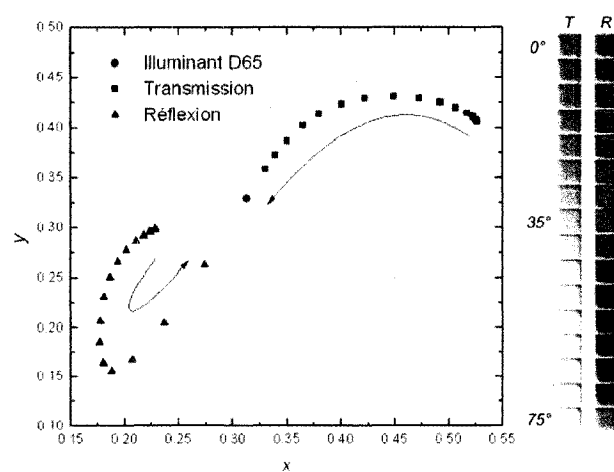


Figure 4.20: Variation de la couleur en transmission (mesurée par spectrophotométrie) et en réflexion sous l'illuminant D65 de 0° à 75° par sauts de 5° pour le filtre F.

4.2.6 FILTRES MÉTAL-DIÉLECTRIQUE

Je présente dans cette section un concept tout-à-fait différent basé sur l'utilisation d'une couche métallique très mince (entre 10 et 30 nm). Il a été énoncé plus haut, dans la partie théorique, que la transmission de tout filtre interférentiel est indépendante du côté selon lequel celui-ci est illuminé. Pour le cas de filtres diélectriques, cette règle s'applique également pour la réflexion, étant donné l'absence d'absorption. Par contre, l'ajout d'une couche métallique rend la réflexion dépendante du côté d'illumination. Les designs G et H sont donc des filtres pour lesquels j'ai maximisé cet effet.

La méthodologie de design fut donc la suivante. Une couche de quelques nanomètres de Ta consistait la première couche du filtre. Une série de couches diélectriques ont ensuite été ajoutées et leur épaisseur optimisée afin d'obtenir une couleur particulière en réflexion. Ensuite, une autre série de couches a été ajoutée avant la couche de Ta et leur épaisseur également optimisée tout en gardant la couleur obtenue précédemment la plus constante possible. Il est ainsi possible d'obtenir plusieurs jeux de couleur.

4.2.6.1 DESIGN G

Le présent design consiste en 26 couches, la sixième couche étant la couche de 30 nm de Ta. Étant donné les effets d'interférence, cette couche de Ta, qui seule aurait absorbée pratiquement toute la lumière incidente, laisse tout de même passer 27% de la lumière en théorie. Pratiquement, tel que le montre le spectre en transmission de la figure 4.21, il ne reste que 20% de la lumière transmise indiquant que nous avons probablement environ 35 nm de déposé. Il faut ajouter que les dépôts n'étant pas tout à fait uniformes, quelques nanomètres de Ta font une grande différence. L'effet escompté est très impressionnant (voir figure 4.23). En effet, le filtre en question est d'un rouge très intense en réflexion et passe au jaune selon l'une de ses faces (voir figure 4.22). De l'autre côté, il passe du mauve au gris et en transmission du vert au bleu et ce, indépendamment du côté d'observation. Inutile de dire que cet effet en mystifie plus d'un et ce, même mes collègues familiers avec le domaine des couches minces. Un dispositif à base de ce phénomène optique serait donc intéressant et efficace.

4.2.7 DESIGN H

Il est évident que 26 couches est beaucoup trop élevé si l'on envisage utiliser ce type de filtre commercialement. Afin de démontrer l'applicabilité de ce type de filtre, j'ai également fait un design comportant seulement neuf couches (voir tableau B.9 en annexe) et qui est

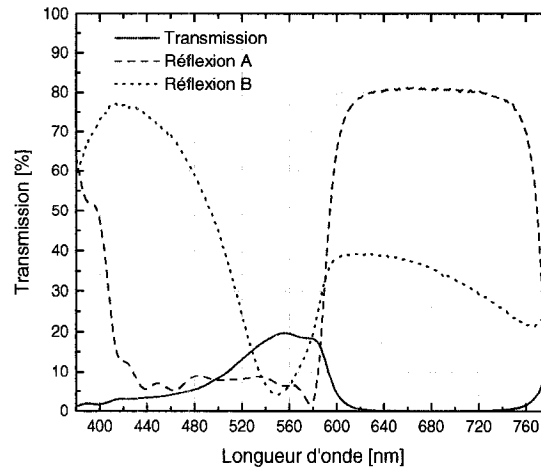


Figure 4.21: Transmission (incidence normale) et réflexion (7.5° d'incidence) des deux côtés en fonction de la longueur d'onde pour le filtre G.

tout aussi impressionnant. Ce filtre a été déposé sur la partie centrale d'un disque compact afin de démontrer une application possible [66]. L'effet escompté a été atteint, mais comme on le voit clairement sur la figure 4.24, l'apparition de craques radiales nous indique que la forme particulière du polymère semble induire un stress dans les couches. Cette même figure nous permet également de voir la dépendance de couleur en réflexion recherchée.

Une autre possibilité intéressante serait de créer une image en utilisant le même filtre, mais en changeant le côté exposé. On pourrait ainsi obtenir une image en réflexion, mais qui en transmission ne serait pas visible ! Il serait également possible de combiner les effets de métamérisme avec ceux qui viennent d'être présentés. En effet un filtre métal-diélectrique métamérique pourrait tout aussi bien être réalisable et offrirait ainsi une multitude de niveaux de sécurité. Finalement, la création d'un motif sur la couche métallique offrirait également un phénomène intéressant, combinant ainsi l'utilisation d'un filtre diélectrique et métal-diélectrique.

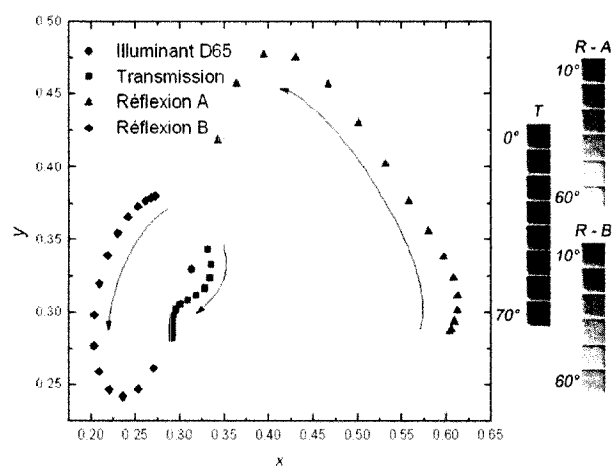


Figure 4.22: Variation théorique de la couleur en transmission et en réflexion sous l'illuminant D65 de 0° à 75° par sauts de 5° pour les côtés A et B du filtre G (les couleurs affichées proviennent de mesures obtenues par spectrophotométrie).

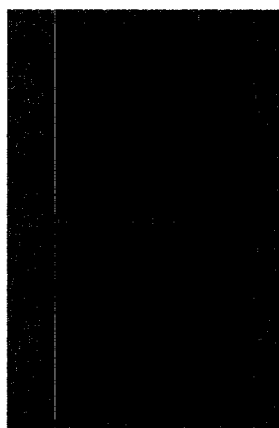


Figure 4.23: Photo du design G.

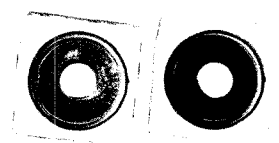


Figure 4.24: Photo du design H déposé sur la partie centrale d'un disque compact.

4.3 CRÉATION DE MOTIFS

4.3.1 INTRODUCTION

L'aspect esthétique de tous dispositifs de sécurité est extrêmement important. Pour ce faire, il est souvent nécessaire de créer un motif sur les filtres interférentiels [67]. Plusieurs possibilités s'offrent à nous, dont voici celles que j'ai pu essayer :

- L'utilisation d'un masque lors de la déposition.
- L'utilisation d'un laser femtoseconde.
- La photolithographie.
- La déposition sur un polymère possédant une couche diminuant l'adhérence (gracieuseté de la BdC).
- Le découpage du filtre déposé sur un polymère à l'aide d'une paire de ciseaux.

Chacune de ces méthodes possède ses forces et ses faiblesses dont je présente sommairement dans les sections qui suivent.

4.3.2 MASQUAGE

L'une des techniques les plus simple afin de créer un motif est de masquer l'une des parties du filtre en utilisant un masque lors de la déposition. Deux méthodes de masquage ont été utilisées dans mon cas, l'utilisation d'un masque d'aluminium ayant des fentes de différentes largeurs et l'utilisation d'un ruban adhésif d'aluminium. Lors de l'utilisation du premier, j'ai constaté qu'il existe une taille minimale de fente permettant de faire un dépôt uniforme et que, en dessous de cette taille, le dépôt est complètement modifié. Il existe également toujours des effets de bords, soit une variation de l'épaisseur des couches proche des bords du masque. Ceci s'explique par le fait que le masque n'est jamais en contact parfait avec le substrat. Malgré que ces effets puissent offrir un élément de sécurité supplémentaire, dans mon cas, ils étaient indésirables. Dans le cas du ruban adhésif, des motifs ont aussi été créés, mais la présence de zones sombres sur les bords du ruban porte à croire qu'il y a eu des arcs qui se sont produits aux extrémités. Il se pourrait donc que, malgré la neutralisation des faisceaux d'ions du DIBS, il reste tout de même quelques ions chargés qui peuvent s'accumuler sur le ruban en aluminium et finalement se décharger à la surface du substrat. Somme toute, mes résultats par masquage furent décevants, surtout pour de petits motifs.

4.3.3 LASER FEMTOSECONDE

L'utilisation d'un laser femtoseconde m'est venue à l'idée, car je voulais graver l'un des deux filtres du design B. Nous avons tout d'abord tenté de graver une couche de SiO_2 déposée sur une gaufre de silicium. Par contre, après avoir mesuré le profil de nos gravures avec un microscope à force atomique, nous nous sommes rapidement rendu compte que nous n'avions pas gravé la couche de SiO_2 , mais plutôt créé une porosité à l'interface substrat-couche. Ceci s'explique facilement si l'on considère qu'à 800 nm, la longueur d'onde du laser utilisé, le SiO_2 ne présente pratiquement aucune absorption, ce qui n'est pas le cas du Si. Ainsi, les prochains essais ont été réalisés sur du verre et il nous a été possible de graver une couche diélectrique. Je n'irai pas plus loin dans les détails de cette technique, puisque je me suis rapidement rendu compte que, malgré l'optimisation de la vitesse de gravure, le temps nécessaire pour créer un motif macroscopique est beaucoup trop long. À titre d'exemple, je présente les lettres LAR (trois premières lettres du nom de mon groupe de recherche : LaRFIS) à la figure 4.25, le résultat d'environ 30 minutes de gravure. Celle-ci a été arrêtée après la lettre R, puisque, comme on peut le constater, une erreur de signe dans le fichier de déplacement du laser a inversé la direction de la patte de la lettre R. On note également les sillons qui représentent chacun des passages du laser. On peut donc conclure que cette méthode de gravure est beaucoup trop lente si l'on veut créer des motifs macroscopiques (les sillons ayant une taille d'environ 25 microns). Par contre, si l'on veut créer des motifs microscopiques, cette technique pourrait être efficace, bien que dispendieuse. Une alternative serait d'utiliser un laser excimère ayant un rayon beaucoup plus élevé.

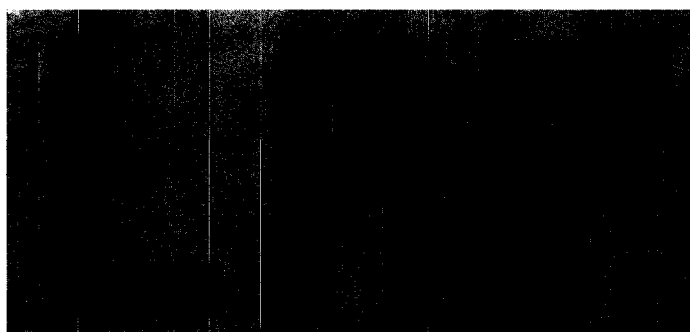


Figure 4.25: Image de la gravure d'un filtre interférentiel par laser femtoseconde.

4.3.4 PHOTOLITHOGRAPHIE

Étant donné les résultats plutôt décevants obtenus avec les deux précédentes techniques, j'ai donc fait un essai de création de motifs par photolithographie. Les résultats obtenus ont dépassé mes attentes. En effet, le motif a été parfaitement reproduit et aucun problème d'adhésion ou d'effets de bord ne s'est produit. La figure 4.26 présente le résultat de cet essai, qui a été fait en prévision de la visite des gens de BdC.

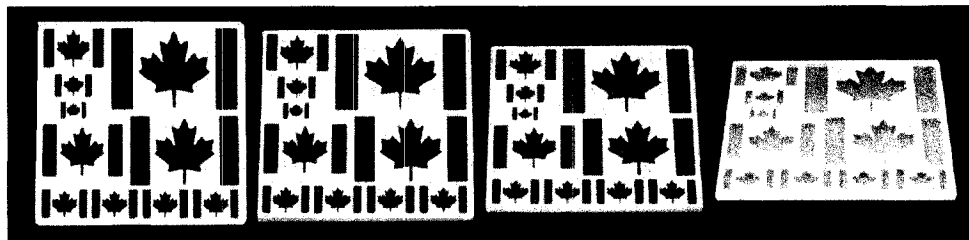


Figure 4.26: Création de motifs par photolithographie.

Cette technique simple offre donc de très bons résultats. Elle nécessite, par contre, beaucoup de temps avant et après la déposition.

4.3.5 DÉPOSITION SUR POLYMÈRE AVEC COUCHE DE FAIBLE ADHÉSION

La technique utilisée par la BdC consiste à déposer leurs filtres sur un substrat de polyéthylène téréphtalate (PET) possédant une couche de faible adhérence. De cette façon, il est possible de transférer leur filtre après application d'un adhésif. J'ai donc pu faire des essais sur leur substrat de PET et tenter de faire des transferts de motifs. Les résultats obtenus suite à l'utilisation de différentes colles ont été décevants. En effet, le filtre en entier craque soit lors du transfert, soit lors du séchage de la colle. De plus, le stress dans les couches est suffisant pour faire gondoler le polymère lors de la déposition, ce qui affecte inévitablement l'uniformité des couches déposées et donc la coloration finale. Dernièrement, j'ai reçu un échantillon de gomme-laque qui, selon les gens de la BdC, devrait offrir de bons résultats. Je n'ai, par contre, pas fait d'essai à ce jour.

4.3.6 DÉCOUPAGE

La déposition sur un polymère de PET, dont l'épaisseur est de 24 microns, m'a permis de découper des motifs en utilisant tout simplement une paire de ciseaux. Évidemment, près des zones de coupure, des micro-craques se sont produites, mais le filtre est resté généralement intact. J'ai ensuite incorporé ce filtre découpé à la surface d'une carte d'identité, chevauchant une photo que j'y avais collée. La carte a ensuite été laminée afin de protéger le filtre et la carte. Ainsi, admettant qu'une personne voudrait changer la photo en enlevant la pellicule de laminage, le filtre restera collé à la surface de la photo et de la carte puisque le PET de faible adhérence empêchera celui-ci de rester collé au laminage. La figure 4.27 présente la carte avec le filtre incorporé tel que dans le cas de la carte d'identité « Identicard Ltd.» [2].

J'ai également pu faire un essai d'utilisation de filtre en transmission [1] sur une carte d'identité. Par contre, la carte étant trop épaisse, lors du laminage, une pression s'est produite au niveau du filtre, ce qui a induit des craques. La figure 4.28 présente le résultat de cet essai.

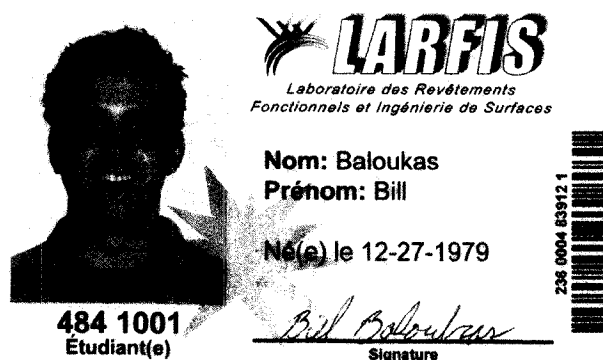


Figure 4.27: Carte avec filtre utilisé en réflexion.

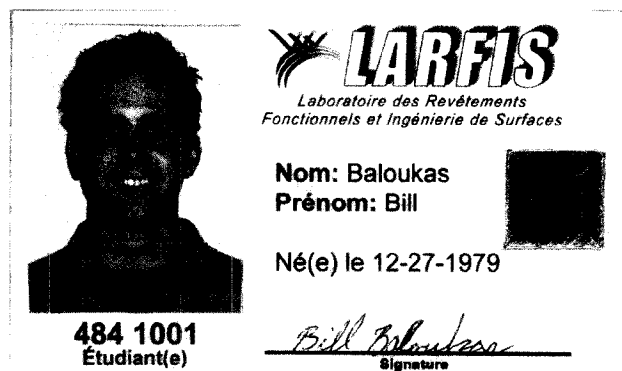


Figure 4.28: Carte avec filtre utilisé en transmission.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

5.1 SOMMAIRE

Nous avons démontré à travers les designs présentés, qu'il est possible de fabriquer des filtres interférentiels plus complexes ayant de nouvelles propriétés, mais dont l'utilisation reste simple, tel que défini lors de l'énonciation des objectifs principaux. À travers l'ajout de différents effets optiques, ces filtres offrent des perspectives intéressantes pour l'avenir de la contrefaçon.

Plus spécifiquement, les trois premiers designs sont des démonstrations de simples changements de couleur qui peuvent être obtenus par l'utilisation de filtres interférentiels.

- Le design A, que l'on peut qualifier de filtre passe-haut, a permis de démontrer un simple changement de couleur et comment il est possible, grâce à ce type de design, d'aller chercher une couleur spécifique à angle d'incidence normale. Toutefois, ce type de variation de couleur est très simpliste et n'ajoute rien aux dispositifs actuels.
- Le deuxième design présenté (design B) est en fait une utilisation des principes du design A, mais à travers la combinaison de deux filtres afin d'obtenir trois variations de couleur différentes et ce, dans le but de pouvoir créer des images polychromatiques. Nous avons vu que par la superposition d'un filtre passe-bas et passe-haut, il est possible d'obtenir trois couleurs très distinctes.
- Finalement, le design C fait usage d'une structure spectrale spécifique afin d'obtenir un changement de couleur inverse, soit du bleu au rouge. Il a été démontré qu'un filtre Fabry-Pérot représente une bonne approximation et qu'il permet ainsi d'obtenir une variation de couleur du violet au rose et un parcours colorimétrique très prononcé.

Afin d'accroître la complexité, soit ajouter une caractéristique supplémentaire au changement de couleur des designs A, B et C, le phénomène de métamérisme (designs D, E et F) a été introduit, en gardant en mémoire l'objectif d'obtenir deux filtres ayant des spectres différents, mais présentant la même couleur à incidence normale. J'ai pu démontrer, grâce à cet effet, la possibilité de créer une image cachée qui n'apparaît que lorsque le dispositif est incliné et ce, dus aux parcours colorimétriques différents des deux filtres. De plus, une caractéristique spectrale a été incluse dans ce design dans le but de permettre l'encodage et l'identification par faisceau laser. En effet, à 632,8 nm, la longueur d'onde d'un laser HeNe,

l'un des filtres possède une transmittance de 95,77 % et l'autre de 5,11 %.

Étant donné la grande différence entre les deux spectres en transmission des filtres du design D, le phénomène de métamérisme, et donc d'image cachée, n'est possible que sous les illuminants C et D65. De plus, grâce à une analyse de la variation de couleur en fonction de l'erreur sur l'épaisseur des couches lors de la déposition, nous avons vu comment il est extrêmement difficile d'obtenir une paire de filtres métamériques dans ce cas-ci. Cette analyse laisse également envisager l'utilisation d'un monitoring par la couleur puisque les résultats démontrent qu'il y a un phénomène de compensation colorimétrique.

Suite à des commentaires encourageants de la part de mes collègues et des gens de l'industrie, j'ai poussé le concept du métamérisme encore plus loin. Les designs E et F sont le fruit de ce processus de recherche et d'optimisation. Ces deux filtres démontrent qu'il est possible d'obtenir un dispositif ne présentant pas les défauts majeurs du design D, soit une sensibilité élevée au choix de sources d'illumination et aux erreurs de déposition. Ainsi, le principe de l'image cachée est préservé sous les types d'illumination les plus courants et le design est plus économiquement envisageable considérant la combinaison filtre-polymère. De plus, le contrôle nécessaire afin de déposer ce type de filtre rend le dispositif final plus complexe à contrefaire et par le fait même, plus sécuritaire.

Finalement, les deux derniers designs (G et H), présentant des changements de couleur en réflexion qui dépendent du côté selon lequel on les observe et une transmission quant à elle indépendante, sont visuellement très attrayants et surprenants. Leur utilisation sur un substrat transparent, telle, par exemple, la partie centrale d'un disque compact, offrirait une technique sûre et simple de vérification d'authenticité. L'objectif qui consistait à ajouter un niveau de complexité au dispositif sans pour autant le rendre difficile à utiliser est donc accompli. De plus, on peut envisager la création d'une image en alternant le côté exposé du même filtre selon un motif défini. On obtiendrait ainsi une image possédant deux couleurs en réflexion, mais uniforme en transmission.

À travers la conception et l'analyse de ces filtres, j'ai également pu accroître mes connaissances du domaine de la colorimétrie et de la sécurité. J'ajouterais que la plupart de mes idées me sont venues après avoir lu un livre non pas sur les filtres optiques, mais sur la colorimétrie!

Une fois ces filtres déposés, la prochaine étape logique de fabrication d'un dispositif est la mise en forme de celui-ci, à travers la création d'un motif afin de le rendre visuellement plaisant. J'ai ainsi démontré qu'il est possible de créer des motifs par l'utilisation de plusieurs techniques différentes, chacune d'elles ayant ses forces et ses faiblesses. Mentionnons

l'ablation laser, qui, malgré sa haute précision, présente un problème de rapidité de production et donc de coûts. Le masquage lors de la déposition fonctionne et est très rapide, mais ceci pour des motifs relativement grands et qui affichent souvent des effets de bords qui peuvent ne pas être désirés. Le dépôt sur polymère de faible adhésion, quant à lui, présente une façon efficace de transférer des motifs, mais nécessite plusieurs essais avant d'offrir de bons résultats. Le découpage est probablement la façon la plus simple et rapide d'obtenir de bons motifs macroscopiques, malgré que ceux-ci affichent toujours quelques micro-craques aux endroits découpés. Finalement, la photolithographie, qui est, selon moi, la méthode la plus intéressante, car elle permet l'obtention de motifs de toutes tailles, clairs, nets et précis.

J'ai par la suite fait quelques essais de transfert sur papier et polymère avec plus ou moins de succès. Il faut dire que l'appareil utilisé afin de déposer mes échantillons, malgré que très performant au niveau du contrôle des taux de dépôt, est très demandant en temps et très capricieux. Je me suis donc retrouvé avec un système qui ne fonctionnait pas à plusieurs reprises. Sans compter qu'à chaque remise à neuf, les taux de dépôt se trouvaient à être modifiés, d'où la nécessité de refaire une caractérisation des couches de SiO_2 et de Ta_2O_5 . Ces problèmes ont fait en sorte que j'avais un nombre limité d'échantillons et que les essais que je pouvais faire en étaient ainsi réduits.

5.2 PERSPECTIVES

Ceci dit, je considère qu'il reste encore plusieurs étapes nécessaires afin d'obtenir un dispositif complet et qui pourrait possiblement être intéressant pour la commercialisation. En effet, les filtres A à H sont des preuves de concept, mais n'ont, pour la plupart, pas été optimisés au niveau du nombre de couches utilisées, mis à part le filtre H. L'utilisation de couches métalliques dans le cas des filtres complètement diélectriques permettrait évidemment de diminuer le nombre de couches. Par contre, il est important à noter qu'il n'existe pas, à priori, de maximum au niveau du nombre de couches, celui-ci étant plutôt fonction de l'application visée et de la sévérité du problème de sécurité à résoudre. Reste également, dans le cas des filtres métamériques, à développer une méthode permettant la création d'un motif combinant polymère et filtre, ce qui, à première vue, n'est pas facile. L'étape de transfert sur un autre substrat doit également être améliorée afin d'éviter l'apparition de craquelures.

En plus de toutes ces considérations techniques, l'innovation au niveau des filtres interférentiels doit se poursuivre. Pensons, par exemple, à l'utilisation de couches anisotropes ou nanocomposites, aux filtres à gradient d'indice, à l'ajout de couches magnétiques, etc. Der-

nièrement, je suis tombé sur deux effets que présentent les deux pierres précieuses suivantes : l'alexandrite et la tourmaline. La première présentant un changement du vert au rouge dépendamment de la source d'illumination (effet alexandrite [68]) et la deuxième présentant un changement du vert au rouge en fonction de l'épaisseur de la pierre (effet Usambara [69]) en plus de l'effet alexandrite. Je crois que des filtres présentant ces effets sont possibles et seraient très intéressants à explorer. Comme quoi la nature est toujours une bonne source d'inspiration !

Finalement, étant donné que je poursuis mes études au doctorat sur le même thème, soit la sécurité, mes objectifs à court et à long terme visent le développement de dispositifs optiques actifs. Citons les matériaux électrochromiques, photochromiques, piézo chromiques, thermochromiques, etc. Pour ce faire, je me pencherai sur l'étude de plusieurs matériaux, entre autres, les matériaux transparents conducteurs. Leur stabilité mécanique, optique, temporelle ainsi que sous différentes conditions (température, humidité, acidité, etc.) sera un aspect primordial qui devra être investigué afin de faciliter une éventuelle intégration de ceux-ci au domaine de la contrefaçon. J'attends avec impatience les années à venir afin de pouvoir poursuivre ma contribution à un domaine qui est toujours en perpétuel mouvement et qui ne cesse de m'inspirer.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.A. Dobrowolski, K.M. Baird, P.D. Carman et A. Waldorf, « Optical interference coatings for inhibiting of counterfeiting », *Optica Acta*, vol. 20, décembre 1973, p. 925–937.
- [2] J.A. Dobrowolski, F.C. Ho et A. Waldorf, « Research on thin film anticounterfeiting coatings at the National Research Council of Canada », *Applied Optics*, vol. 28, juillet 1989, p. 2702–2717.
- [3] G. Wyszecki et W.S. Stiles, *Color Science - Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. USA : John Wiley & Sons, Inc., second éd., 1982.
- [4] D.L. MacAdam, *Color Measurement Theme and Variations*, vol. 27 of *Optical Sciences*. Springer-Verlag, second éd., New York, USA 1985.
- [5] K. Nassau, *The physics and chemistry of color*. Wiley series in pure and applied optics, USA : John Wiley & Sons, Inc., second éd., 2001.
- [6] R.S. Berns, *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology*. John Wiley and Sons Inc., 2000.
- [7] W.A. Thornton, « Spectral sensitivities of the normal human visual system, color-matching functions and their principles, and how and why the two sets should coincide », *Color research and application*, vol. 24, avril 1999, p. 139–156.
- [8] G.A. Agoston, *Color Theory and Its Application in Art and Design*. USA : Springer, 1979.
- [9] International Commission on Illumination, éd., *Colorimetry*. CIE, 1986.
- [10] R.L. van Renesse, *Optical Document Security*. Delft, The Netherlands : Artech House, second éd., 1998.
- [11] B. Hill, Th. Roger et F.W. Vorhagen, « Comparative analysis of quantization of color spaces on the basis of the CIELAB color difference formula », *ACM Transactions on Graphics*, vol. 16, avril 1997, p. 109–154.
- [12] D.L. MacAdam, « Visual sensitivities to color differences in daylight », *Journal of the Optical Society of America*, vol. 32, mai 1942, p. 247–274.

- [13] M.R. Luo, G. Cui et B. Rigg, « The development of the CIE 2000 colour-difference formula : CIEDE2000 », *Color research and application*, vol. 26, octobre 2001, p. 340–350.
- [14] H.A.M. de Heij, « A method for measuring the public's appreciation and knowledge of banknotes », dans *Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques IV* (Rudolph L. van Renesse, éd.), vol. 4677, 2002.
- [15] M.L. Cattai, « Counterfeiting is out of control », *International Herald Tribune*, mai 2005.
- [16] L.A. DiNunzio et L. Clarke, « The new color of money : safer, smarter, more secure », dans *Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques V* (Rudolph L. van Renesse, éd.), vol. 5310, 2004.
- [17] M. Musgrove, « Sleuths crack tracking code discovered in color printers », *Washington Post*, octobre 2005, p. 2.
- [18] R.M. Klein, S. Gadbois et J.J. Christie, « Perception and detection of counterfeit currency in Canada : Note quality, training and security features », dans *Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques V* (Rudolph L. van Renesse, éd.), vol. 5310, 2004.
- [19] I.M. Lancaster et A. Mitchell, « The growth of optically variable features on banknotes », dans *Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques V* (Rudolph L. van Renesse, éd.), vol. 5310, 2004.
- [20] L. Convetry, « Life of polymer currency notes - A study », dans *XV Pacific Rim Banknote Printer's Conference*, 2001.
- [21] International Polymer Currency Association, "The new paradigm in currency." Bulletin, février 2005.
- [22] L. Setlakwe et L.A. DiNunzio, « Comparative analysis of public opinion research in the U.S. and Canada », dans *Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques V* (Rudolph L. van Renesse, éd.), vol. 5310, 2004.
- [23] M. Perron, J.-M. Grimal et F. Beauchet, « Chips in banknotes for a banknote electronic signature », dans *Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques V* (Rudolph L. van Renesse, éd.), vol. 5310, 2004.

- [24] J. Yoshida, « Euro bank notes to embed RFID chips by 2005 », *EETimes*, décembre 2001.
- [25] A. Argoitia, V.P. Raksha et R.W. Phillips, « Integration of contrasting technologies into advanced optical security devices », dans *Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques V* (Rudolph L. van Renesse, éd.), vol. 5310, 2004.
- [26] R.W. Phillips et A. Argoitia, « Using vacuum roll coaters to produce anti-counterfeiting devices », dans *Technical Conference Proceedings* (Society of Vacuum Coaters, éd.), 2005.
- [27] F. Guessous, T. Juchem et N. Hampp, « Computer generated holograms recorded in bacteriorhodopsin », dans *Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques V* (Rudolph L. van Renesse, éd.), vol. 5310, 2004.
- [28] N. Hampp, M. Neebe, T. Juchem, M. Wolperdinger, M. Geiger et A. Schmuck, « Multi-functional optical security features based on bacteriorhodopsin », dans *Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques V* (Rudolph L. van Renesse, éd.), vol. 5310, 2004.
- [29] H. Nagashina et K. Saito, « New security system for ID certificates in IT society », dans *Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques V* (Rudolph L. van Renesse, éd.), vol. 5310, 2004.
- [30] M. Born et E. Wolf, *Principles of Optics*. Cambridge University Press, 1999.
- [31] M.R. Wertheimer, *Diélectriques - Notes de cours 8.533*. École Polytechnique de Montréal, 1999.
- [32] M. Ohring, *The Materials Science of Thin Films*. Academic Press Limited, 1992.
- [33] H.A. Macleod, *Thin-Film Optical Filters*. Institute of Physics Publishing, 1986.
- [34] S. Larouche, « Étude des mélanges de SiO₂/TiO₂ déposés par PECVD et fabrication de filtres à gradient d'indice », Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montreal, Canada, 2003.
- [35] R.W. Phillips et A.F. Bleikolm, « Optical coatings for document security », *Applied Optics*, vol. 35, octobre 1996, p. 5529–5534.

- [36] R.W. Phillips et M. Nofi, « Colors by chemistry or by physics ? », dans *42nd Annual technical conference proceedings*, 1999.
- [37] T. Jagielinski, « Magnetic imaging of currencies and secure documents », dans *Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques IV* (Rudolph L. van Renesse, éd.), vol. 4677, 2002.
- [38] P.G. Coombs, V.P. Raksha et T. Markantes, « Overt and covert verification via magnetic optical security devices », dans *Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques IV* (Rudolph L. van Renesse, éd.), vol. 4677, 2002.
- [39] H.R. Kaufman, « Broad-beam ion sources (invited) », *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 61, janvier 1990, p. 230–235.
- [40] Pulket et Guenther, *Thin films for optical systems*, ch. 4 - Reactive physical vapor deposition. Marcel Dekket Inc., 1995.
- [41] J.E. Klemberg-Sapieha, J. Oberste-Berghaus, L. Martinu, R. Blacker, I. Stevenson, G. Sadkin, D. Morton, S. McEldowney, R. Klinger, P.J. Martin, N. Court, S. Dligatch, M. Gross et R.P. Netterfield, « Mechanical characteristics of optical coatings prepared by various techniques : a comparative study », *Applied Optics*, vol. 43, mai 2004, p. 2670–2679.
- [42] L. Martinu et D. Poitras, « Plasma deposition of optical films and coatings : A review », *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 18, novembre/décembre 2000, p. 2619–2645.
- [43] M. Meunier, L. Martinu et M.R. Wertheimer, *Couche minces*. École Polytechnique de Montréal, troisième éd., janvier 2003.
- [44] J.M.E. Harper, J.J. Cuomo et H.R. Kaufman, « Technology and applications of broad-beam ion sources used in sputtering. Part ii. applications », *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. 21, septembre/octobre 1982.
- [45] H.R. Kaufman, J.M.E. Harper et J.J. Cuomo, « Developments in broad-beam, ion-source technology and applications », *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. 21, septembre/octobre 1982.
- [46] D.M. Mattox, « Particle bombardment effects on thin-film deposition : A review », *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 7, mai 1989, p. 1105–1114.

- [47] J.M.E. Harper, J.J. Cuomo, R.J. Gambino et H.R. Kaufman, « Modification of thin film properties by ion bombardment during deposition », *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B*, vol. B7-8, mars 1985, p. 886–892.
- [48] R. Messier, A.P. Giri et R.A. Roy, « Revised structure zone model for thin film physical structure », *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 2, avril/juin 1984, p. 500–503.
- [49] J.J. Cuomo, S.M. Rossnagel et H.R. Kaufman, *Handbook of Ion Beam Processing Technology - Principles, Deposition, Film Modification and Synthesis*. USA : Noyes Publications, 1989.
- [50] A. Amassian, *Ion bombardment effects in low-pressure plasmas : In situ spectroscopic ellipsometry and Monte Carlo simulation study*. Thèse de doctorat, Université de Montréal, Canada, décembre 2005.
- [51] M. Cevro et G. Carter, « Ion-beam and dual-ion-beam sputter deposition of tantalum oxide films », *Optical Engineering*, vol. 34, février 1995, p. 596–606.
- [52] J.-C. Hsu et C.-C. Lee, « Single- and dual-ion beam sputter deposition of titanium oxide films », *Applied Optics*, vol. 37, mars 1998, p. 1171–1176.
- [53] C.-C. Lee, J.-C. Hsu, D.T. Wei et J.-H. Lin, « Morphology of dual beam ion sputtered films investigated by atomic force microscopy », *Thin Solid Films*, vol. 308-309, octobre 1997, p. 74–78.
- [54] G. Emiliani et S. Scaglione, « Properties of silicon and aluminium oxide thin films deposited by dual ion beam sputtering », *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 5, août 1987, p. 1824–1827.
- [55] K.H. Müller, « Model for ion-assisted thin-film densification », *J. Appl. Phys.*, vol. 59, juillet 1986, p. 2803–2807.
- [56] F.L. Williams, D.W. Reicher, CB. Juang et J.R. McNeil, « Metal oxides deposited using ion assisted deposition at low temperature », *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 7, mai 1989, p. 2286–2288.
- [57] H.R. Kaufman, « Broad-beam ion sources : Present status and future directions », *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 4, mai 1986, p. 764–771.
- [58] Ion Tech Inc., *Instruction Manual 16cm RF ion source*. CO, USA, mars 1999.

- [59] H.R. Kaufman, « Technology of ion beam sources used in sputtering », *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. 15, mars/avril 1978, p. 272–276.
- [60] H.R. Kaufman et J.M.E. Harper, « Ion-assist applications of broad-beam ion sources », dans *Advances in Thin Film Coatings for Optical Applications*, vol. 5527, 2004.
- [61] J.A. Woollam Co., *Guide to using WVASE32*. Lincoln, NE, USA, janvier 2001.
- [62] H.G. Tompkins et E.A. Irene, *Handbook of ellipsometry*. NY, USA : William Andrew Publishing and Springer-Verlag, 2005.
- [63] Perkin Elmer, *Lambda 19 UV/VIS & UV/VIS/NIR Spectrometers - User documentation volume 1-3 - Instrument manual*. Germany, 1991.
- [64] Tencor, *Tencor ®FLX-2900 thin film stress measurement - User manual*. CA, USA, 1993.
- [65] W.C. Oliver et G.M. Pharr, « An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments », *Journal of material research*, vol. 7, juin 1992, p. 1564–1583.
- [66] B. Sullivan, L. Li, J.A. Dobrowolski et P.D. Grant, “Optical storage media having visible logos.” Brevet américain 5,510,163, 23 avril 1996.
- [67] T. Merry et R.G. Hutton, “Latent image forming process.” Brevet américain 4,033,059, 9 août 1972.
- [68] Y. Liu, J.E. Shigley, E. Fritsch et S. Hemphill, « A colorimetric study of the alexandrite effect in gemstones », *The Journal of Gemmology*, vol. 26, no. 2, 1999, p. 371–385.
- [69] Y. Liu, J.E. Shigley et A. Halvorsen, « Colour hue change of a gem tourmaline from Umba Valley, Tanzania », *The Journal of Gemmology*, vol. 26, no. 2, 1999, p. 386–396.

ANNEXE A

CIEDE2000

Voici les étapes nécessaires afin de calculer la différence de couleurs entre un standard et un échantillon selon le modèle CIEDE2000 :

- Obtenir les coordonnées $L^*a^*b^*$ du standard et de l'échantillon.
- Calculer a' , C' et h' :

$$L' = L^* \quad (\text{A.1})$$

$$a' = (1 + G)a^* \quad (\text{A.2})$$

$$b' = b^* \quad (\text{A.3})$$

$$C' = \sqrt{a'^2 + b'^2} \quad (\text{A.4})$$

$$h' = \tan^{-1}(b'/a') \quad (\text{A.5})$$

où

$$G = 0,5 \left(1 - \sqrt{\frac{\overline{C_{ab}^*}^7}{\overline{C_{ab}^*}^7 - 25^7}} \right) \quad (\text{A.6})$$

avec $\overline{C_{ab}^*}$ étant la moyenne des C_{ab}^* de nos deux objets.

- Calculer $\Delta L'$, $\Delta C'$ et $\Delta H'$:

$$\Delta L' = L'_e - L'_s \quad (\text{A.7})$$

$$\Delta C' = C'_e - C'_s \quad (\text{A.8})$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C'_e C'_s} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right) \quad (\text{A.9})$$

où

$$\Delta h' = h'_e - h'_s \quad (\text{A.10})$$

- Calculer CIEDE2000

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)} \quad (\text{A.11})$$

où

$$S_L = 1 + \frac{0,015(\overline{L'} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\overline{L'} - 5)^2}} \quad (\text{A.12})$$

et

$$S_C = 1 + 0,045\overline{C'} \quad (\text{A.13})$$

et

$$S_H = 1 + 0,015\overline{C'}T \quad (\text{A.14})$$

où

$$T = 1 - 0,17 \cos(\overline{h'} - 30^\circ) + 0,24 \cos(2\overline{h'}) + 0,32 \cos(3\overline{h'} + 6^\circ) - 0,20 \cos(4\overline{h'} - 63^\circ) \quad (\text{A.15})$$

et

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C \quad (\text{A.16})$$

et

$$\Delta\theta = 30 \exp \left\{ - [(\overline{h'} - 275^\circ)/25]^2 \right\} \quad (\text{A.17})$$

et finalement

$$R_C = 2\sqrt{\frac{\overline{C'}^7}{\overline{C'}^7 + 25^7}} \quad (\text{A.18})$$

Il est à noter que $\overline{L'}$, $\overline{C'}$ et $\overline{h'}$ sont les valeurs moyennes de L' , C' et h' pour les deux échantillons. Lorsque la moyenne des h' est calculée, il faut s'assurer que la différence entre les deux est inférieure à 180° . Sinon, il faut soustraire 360° de la plus grande valeur.

ANNEXE B

DESIGNS DES FILTRES A À H

Tableau B.1: Design du filtre A.

#	Matériau	Épaisseur (nm)	# (suite)	Matériau	Épaisseur (nm)
1	Ta ₂ O ₅	10,19	10	SiO ₂	112,4
2	SiO ₂	15,36	11	Ta ₂ O ₅	81,5
3	Ta ₂ O ₅	90,07	12	SiO ₂	113,21
4	SiO ₂	126,71	13	Ta ₂ O ₅	81,56
5	Ta ₂ O ₅	84,57	14	SiO ₂	117,34
6	SiO ₂	114,39	15	Ta ₂ O ₅	80,04
7	Ta ₂ O ₅	83,46	16	SiO ₂	127,61
8	SiO ₂	112,01	17	Ta ₂ O ₅	72,89
9	Ta ₂ O ₅	82,09	18	SiO ₂	66,4

Tableau B.2: Design du filtre B.

Filtre Passe-bas			Filtre Passe-haut		
#	Matériau	Épaisseur (nm)	#	Matériau (nm)	Épaisseur
1	Ta ₂ O ₅	50,16	1	Ta ₂ O ₅	91,08
2	SiO ₂	66,69	2	SiO ₂	118,45
3	Ta ₂ O ₅	48,12	3	Ta ₂ O ₅	84,54
4	SiO ₂	69,16	4	SiO ₂	114,39
5	Ta ₂ O ₅	49,43	5	Ta ₂ O ₅	83,75
6	SiO ₂	71,33	6	SiO ₂	113,81
7	Ta ₂ O ₅	50,31	7	Ta ₂ O ₅	83,69
8	SiO ₂	63,9	8	SiO ₂	115,70
9	Ta ₂ O ₅	43,79	9	Ta ₂ O ₅	78,62
10			10	SiO ₂	45,71

Tableau B.3: Design du filtre C.

#	Matériau	Épaisseur (nm)	# (suite)	Matériau (nm)	Épaisseur
1	Ta ₂ O ₅	55,20	10	SiO ₂	105,70
2	SiO ₂	93,90	11	Ta ₂ O ₅	57,40
3	Ta ₂ O ₅	55,50	12	SiO ₂	96,30
4	SiO ₂	97,30	13	Ta ₂ O ₅	55,70
5	Ta ₂ O ₅	54,30	14	SiO ₂	97,00
6	SiO ₂	96,50	15	Ta ₂ O ₅	55,40
7	Ta ₂ O ₅	55,20	16	SiO ₂	95,60
8	SiO ₂	100,50	17	Ta ₂ O ₅	54,20
9	Ta ₂ O ₅	92,10			

Tableau B.4: Design du filtre D - Partie A.

#	Matériau	Épaisseur (nm)	# (suite)	Matériau	Épaisseur (nm)
1	Ta ₂ O ₅	65,61	11	SiO ₂	50,65
2	SiO ₂	151,61	12	Ta ₂ O ₅	72,93
3	Ta ₂ O ₅	63,94	13	SiO ₂	56,34
4	SiO ₂	81,88	14	Ta ₂ O ₅	81,03
5	Ta ₂ O ₅	56,87	15	SiO ₂	62,02
6	SiO ₂	63,40	16	Ta ₂ O ₅	39,33
7	Ta ₂ O ₅	38,69	17	SiO ₂	24,65
8	SiO ₂	54,31	18	Ta ₂ O ₅	84,07
9	Ta ₂ O ₅	50,52	19	SiO ₂	63,30
10	SiO ₂	66,54			

Tableau B.5: Design du filtre D - Partie B.

#	Matériau	Épaisseur (nm)	# (suite)	Matériau	Épaisseur (nm)
1	Ta ₂ O ₅	73,74	9	Ta ₂ O ₅	61,30
2	SiO ₂	117,61	10	SiO ₂	76,34
3	Ta ₂ O ₅	79,55	11	Ta ₂ O ₅	19,62
4	SiO ₂	99,90	12	SiO ₂	75,86
5	Ta ₂ O ₅	75,09	13	Ta ₂ O ₅	61,16
6	SiO ₂	139,43	14	SiO ₂	90,70
7	Ta ₂ O ₅	66,14	15	Ta ₂ O ₅	63,80
8	SiO ₂	90,95			

Tableau B.6: Design du filtre E.

#	Matériau	Épaisseur (nm)	# (suite)	Matériau	Épaisseur (nm)
1	SiO ₂	73,03	9	SiO ₂	77,41
2	Ta ₂ O ₅	47,85	10	Ta ₂ O ₅	50,42
3	SiO ₂	72,93	11	SiO ₂	75,57
4	Ta ₂ O ₅	49,57	12	Ta ₂ O ₅	50,72
5	SiO ₂	75,83	13	SiO ₂	78,18
6	Ta ₂ O ₅	50,91	14	Ta ₂ O ₅	52,67
7	SiO ₂	77,71	15	SiO ₂	79,38
8	Ta ₂ O ₅	51,66	16	Ta ₂ O ₅	53,47

Tableau B.7: Design du filtre F.

#	Matériau	Épaisseur (nm)	# (suite)	Matériau	Épaisseur (nm)
1	Ta ₂ O ₅	54,12	9	Ta ₂ O ₅	53,49
2	SiO ₂	66,84	10	SiO ₂	81,01
3	Ta ₂ O ₅	43,27	11	Ta ₂ O ₅	56,69
4	SiO ₂	66,12	12	SiO ₂	81,97
5	Ta ₂ O ₅	69,01	13	Ta ₂ O ₅	54,81
6	SiO ₂	9,45	14	SiO ₂	81,61
7	Ta ₂ O ₅	68,70	15	Ta ₂ O ₅	56,54
8	SiO ₂	75,16			

Tableau B.8: Design du filtre G.

#	Matériau	Épaisseur (nm)	# (suite)	Matériau	Épaisseur (nm)
1	Ta ₂ O ₅	56,58	14	SiO ₂	96,58
2	SiO ₂	78,86	15	Ta ₂ O ₅	98,03
3	Ta ₂ O ₅	58,19	16	SiO ₂	89,54
4	SiO ₂	74,68	17	Ta ₂ O ₅	87,25
5	Ta ₂ O ₅	67,84	18	SiO ₂	115,82
6	Ta	30,00	19	Ta ₂ O ₅	73,53
7	Ta ₂ O ₅	40,26	20	SiO ₂	124,08
8	SiO ₂	84,50	21	Ta ₂ O ₅	74,43
9	Ta ₂ O ₅	57,70	22	SiO ₂	125,93
10	SiO ₂	100,78	23	Ta ₂ O ₅	74,67
11	Ta ₂ O ₅	7,20	24	SiO ₂	133,84
12	SiO ₂	30,49	25	Ta ₂ O ₅	69,49
13	Ta ₂ O ₅	66,05	26	SiO ₂	69,52

Tableau B.9: Design du filtre H.

#	Matériau	Épaisseur (nm)
1	Ta ₂ O ₅	96,46
2	SiO ₂	105,46
3	Ta ₂ O ₅	166,77
4	SiO ₂	83,77
5	Ta	9,50
6	Ta ₂ O ₅	154,06
7	SiO ₂	301,26
8	Ta ₂ O ₅	97,33
9	SiO ₂	234,00

ANNEXE C

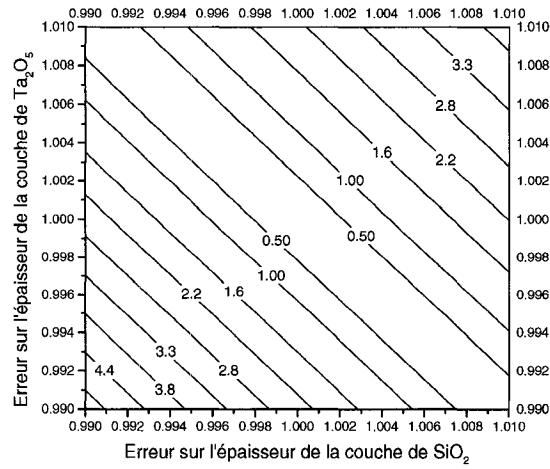
CARTE DE L'INDICE DE MÉTAMÉRISME CIEDE2000 POUR LES
DESIGNS D ET E

Figure C.1: Variation de la couleur (*CIE2000*) en fonction de l'erreur sur l'épaisseur des couches pour le filtre D - Partie A.

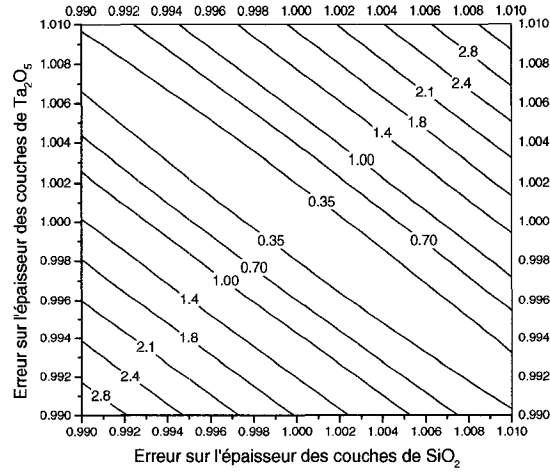


Figure C.2: Variation de la couleur (*CIE2000*) en fonction de l'erreur sur l'épaisseur des couches pour le filtre D - Partie B.

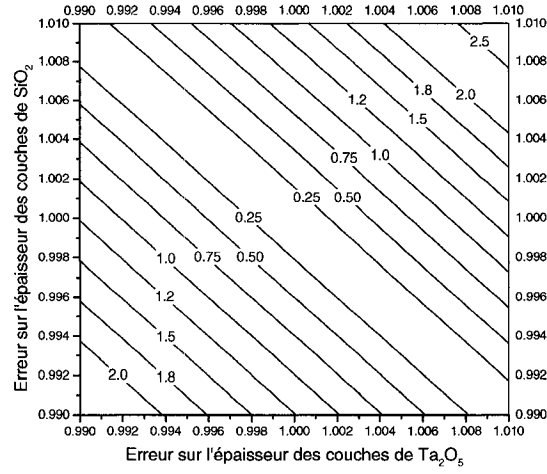


Figure C.3: Variation de la couleur (*CIE2000*) en fonction de l'erreur sur l'épaisseur des couches pour le design F.