



HAL
open science

Développement d'une nouvelle technologie pour la réalisation de filtres interférentiels de type "allumette"

Marie Duchêne

► To cite this version:

Marie Duchêne. Développement d'une nouvelle technologie pour la réalisation de filtres interférentiels de type "allumette". Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III, 2009. Français. <NNT : >. <tel-00471569>

HAL Id: tel-00471569

<https://theses.hal.science/tel-00471569v1>

Submitted on 8 Apr 2010

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

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



HAL Authorization

TITRE :

**DEVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE TECHNOLOGIE POUR LA
REALISATION DE FILTRES INTERFERENTIELS DE TYPE « ALLUMETTE »**

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PAUL CEZANNE, AIX-MARSEILLE III

Discipline : Optique, Image et Signal

École Doctorale : Physique & Sciences de la matière

présentée et soutenue publiquement par

Marie DUCHÊNE

le 17 avril 2009

JURY

M. Pierre CHAVEL (rapporteur)

M. Ludvik MARTINU (rapporteur)

M. Raymond MERCIER

Mme Catherine Nary MAN

Mme Catherine GREZES-BESSET

M. Frédéric LEMARQUIS (co-directeur de thèse)

M. Michel LEQUIME (directeur de thèse)

Année 2009

A la mémoire de mon père

Remerciements

Cette thèse s'est déroulée entre l'équipe RCMO de l'Institut Fresnel et la société CILAS dans le cadre d'un financement CIFRE de mars 2006 à mars 2009. Pour cela je remercie la direction de ces 2 entités, et plus particulièrement M. Hughes Giovannini, directeur de l'Institut Fresnel, et M. Gilles Borsoni, directeur de l'établissement CILAS de Marseille.

Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse M. Michel Lequime pour m'avoir fait partager à la fois son expérience et ses conseils, mais également pour sa motivation et ses grandes qualités humaines. Je remercie vivement M. Frédéric Lemarquis, codirecteur de cette thèse, pour sa grande disponibilité, ses remarques toujours avisées, ainsi que pour nos nombreuses discussions, enrichissantes tant sur le plan scientifique que humain. Je voudrais également remercier Mme Catherine Grèzes-Besset, responsable industrielle de cette thèse, pour la confiance qu'elle a su m'accorder, pour son apport scientifique et technique mais également humain.

Je suis très reconnaissante envers les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger mon travail. Je remercie Mme Catherine Nary Man de l'Observatoire de la Côte d'Azur, M. Raymond Mercier du Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, ainsi que M. Ludvik Martinu de Polytechnique Montréal et M. Pierre Chavel du Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, pour l'intérêt porté à cette thèse en acceptant d'en être les rapporteurs.

Je voudrais remercier toutes les personnes qui, par une collaboration fructueuse, m'ont permis de mener à bien ce projet. Mes remerciements s'adressent aux personnes de l'IGR de l'Université de Glasgow, et plus particulièrement Mariëlle van Veggel, pour nos différents échanges ainsi que la réalisation d'assemblages. Je remercie également Michael Maurin, chimiste dans l'équipe MOSAIC de l'Institut Fresnel, pour son aide précieuse quant à la compréhension et la mise en œuvre des différents aspects chimie de ces travaux.

Je tiens à remercier vivement l'ensemble des personnes de l'établissement CILAS de Marseille pour l'intérêt qu'ils ont chacun porté à ma thèse, leurs conseils et leur soutien mais également pour leur accueil, leur écoute et leur sympathie.

Je remercie les membres de l'équipe RCMO de l'Institut Fresnel à la fois pour nos nombreux échanges scientifiques mais également pour la convivialité qu'ils instaurent au quotidien. Merci donc à Fabien, Laetitia et Cihan, à Bruno et Sébastien maintenant partis plus ou moins loin, à Stéphane et Marie-Maude à qui je souhaite bonne chance pour la suite.

Je souhaite également adresser mes remerciements à l'ensemble des personnes de l'Institut Fresnel, doctorants, chercheurs et personnels administratifs, pour leur accueil et leur disponibilité.

Au cours de cette thèse j'ai eu la chance de rencontrer des personnes que pour leur écoute et leur amitié, les sorties et les rires, je tiens à remercier ici : Anne, Ale, Aude, Capou, Cyril, Davy, Fabiana, Greg, Guigui, Laurent, Marti, Mika, MMdDB, Myriam, Nadine, Seb, Richard,...

Je tiens aussi à adresser de tout cœur un grand merci à toute ma famille, et plus particulièrement à ma mère, mes frères et sœurs sans oublier mes neveux. Merci aussi à l'ensemble de mes amis et à tous ceux avec qui j'ai pu partager tous ces moments, avec une dédicace toute particulière aux Vosgiens et à la troupe des Z'utopistes.

Enfin, à toutes celles et ceux que je ne nommerai pas mais qui de près ou d'un peu plus loin ont contribué à rendre agréable ces trois années, merci.

Table des matières

Introduction.....	1
Chapitre I. Contexte.....	3
I. Imageur multispectral embarqué sur satellite défilant.....	3
I.1. Modes d'acquisition d'une image.....	3
I.2. Sélection spectrale dans le champ par filtre allumette	4
II. Spécifications d'un filtre allumette	6
II.1. Géométrie.....	6
II.1.1. Plan focal	6
II.1.2. Dimensions typiques	7
II.2. Fonction de filtre à bande étroite.....	7
II.2.1. Bandes spectrales d'observation	8
II.2.2. Performances attendues	9
II.3. Fonction d'absorbeur	12
II.3.1. Diaphonie	12
II.3.2. Structure des absorbeurs.....	13
III. Etat de l'art	14
III.1. Synthèse d'empilements multicouches interférentiels	14
III.1.1. Spécifications de départ.....	14
III.1.2. Couche quart d'onde.....	15
III.1.3. Filtre passe-bande	15
III.2. Technologies de dépôt	17
III.2.1. Dépôt par évaporation.....	17
III.2.2. Dépôt par pulvérisation	17
III.3. Procédés de structuration.....	18

III.3.1.	Procédés soustractifs.....	18
III.3.2.	Procédés additifs.....	19
IV.	Principe de fabrication monolithique	20
IV.1.	Principales étapes.....	20
IV.2.	Limites	21
V.	Conclusion	23
Chapitre II.	Assemblage de filtres	25
I.	Architectures possibles	25
I.1.	Fonction de filtrage spectral	25
I.1.1.	Substrats de dimensions supérieures	26
I.1.2.	Substrats « allumettes »	27
I.2.	Fonction absorbeur.....	28
I.2.1.	Sur les allumettes	28
I.2.2.	Sur une fenêtre commune indépendante.....	29
I.2.3.	Masque métallique	30
II.	Contraintes sur l'assemblage	30
II.1.	Contraintes imposées par l'architecture du composant.....	30
II.2.	Contraintes imposées par l'environnement spatial.....	31
III.	Technologies d'assemblage	32
III.1.	Collage.....	32
III.1.1.	Collage structural	32
III.1.2.	Collage optique transparent.....	33
III.1.3.	Collage optique noir	34
III.2.	Adhérence moléculaire.....	34
III.2.1.	Principe	34
III.2.2.	Tests.....	35
III.3.	Assemblage catalysé par hydroxyde	39
III.3.1.	Principe	40
III.3.2.	Tests.....	41
III.4.	Autres technologies envisagées	42
III.4.1.	Low Temperature Bonding (LTB).....	42
III.4.2.	Chemically Activated Direct Bonding (CADB).....	43
IV.	Synthèse des fonctions optiques	43

IV.1.	Contraintes liées à l'architecture du composant	44
IV.1.1.	Réflexions multiples	44
IV.1.2.	Nombre d'interfaces	46
IV.2.	Influence du substrat dans la fonction optique	50
IV.2.1.	Verres colorés	50
IV.2.2.	Chemin optique	53
V.	Conclusion	54
Chapitre III. Métrologie		57
I.	Besoins.....	57
I.1.	Spécifications optiques	57
I.2.	Spécifications géométriques	58
II.	Banc de caractérisation.....	58
II.1.	Principe	58
II.2.	Structure du montage	59
II.2.1.	Système optique d'entrée	60
II.2.2.	Système optique relais.....	63
II.2.3.	Système optique de sortie	66
II.3.	Automatisation	68
II.3.1.	Déplacement de l'échantillon	68
II.3.2.	Extraction des principales caractéristiques spectrales	69
III.	Performances.....	69
III.1.	Stabilité.....	69
III.2.	Dynamique de mesure	70
III.3.	Résolutions	70
III.3.1.	Résolution spatiale.....	70
III.3.2.	Résolution spectrale.....	72
III.4.	Lumière parasite.....	73
IV.	Mise en œuvre.....	75
IV.1.	Substrat de référence	75
IV.2.	Uniformité le long d'une allumette	76
V.	Conclusion	77

Chapitre IV. Réalisation	79
I. Architecture de composant.....	80
I.1. Structure proposée	80
I.2. Validation de l'architecture choisie	81
I.3. Principales étapes de fabrication	83
II. Réalisation des allumettes	84
II.1. Spécifications spectrales	84
II.1.1. Performances à atteindre.....	84
II.1.2. Choix des bandes spectrales.....	85
II.2. Etude théorique des empilements.....	86
II.2.1. Voies VNIR.....	86
II.2.2. Voies SWIR.....	91
II.3. Caractérisation spectrale avant assemblage	94
II.3.1. Voies VNIR.....	95
II.3.2. Voies SWIR.....	98
II.4. Absorbeur des faces latérales des allumettes	101
III. Réalisation des fenêtres d'entrée et de sortie	101
III.1. Structure des fenêtres	102
III.1.1. Principales caractéristiques	102
III.1.2. Définition des motifs.....	102
III.2. Structuration	103
III.2.1. Choix du procédé de structuration	103
III.2.2. Géométrie du substrat de départ	104
III.3. Réalisation des fenêtres	106
III.3.1. Masques lithographiques	106
III.3.2. Exemples de réalisation.....	107
IV. Qualification	110
IV.1. Caractérisation spectrale	110
IV.1.1. Composant VNIR	111
IV.1.2. Composant SWIR	113
IV.2. Tests de qualification.....	116
V. Conclusion	116

Chapitre V. Transfert de filtres	119
I. Principe	119
I.1. Procédé de séparation d'empilement	119
I.2. Procédé de transfert d'empilement	121
I.3. Intégration de ce procédé dans la réalisation de filtres allumettes	122
I.3.1. Structuration d'empilement par procédé de transfert	122
I.3.2. Architecture envisagée	122
II. Séparation de l'empilement.....	123
II.1. Par couche de cryolite	123
II.2. Par couche de chrome.....	125
II.2.1. Action du solvant.....	125
II.2.2. Tests de séparation sur des substrats témoins	126
II.3. Par couche d'aluminium.....	127
II.3.1. Action du solvant.....	127
II.3.2. Tests de séparation sur des substrats témoins	131
II.4. Bilan de l'étape de séparation.....	133
III. Assemblage.....	134
III.1. Solutions proposées	134
III.1.1. Identification des besoins.....	134
III.1.2. Validation des procédés retenus.....	134
III.2. Déformations dues aux contraintes dans les empilements	135
III.2.1. Formule de Stoney.....	135
III.2.2. Cas d'une couche métallique déposée par évaporation.....	136
III.2.3. Cas d'empilements déposés par technologie DIBS.....	138
III.3. Bilan de l'étape d'assemblage	139
IV. Transfert	141
IV.1. Configuration « aluminium »	141
IV.2. Configuration « chrome »	142
V. Conclusion	145
Conclusion	147
Références	149

Introduction

Le 23 juillet 1972, la NASA lançait le premier satellite civil d'observation de la Terre, Landsat-1, et révolutionnait notre façon de voir et de comprendre notre planète. Depuis, l'observation de la Terre est devenue un enjeu stratégique, aujourd'hui indispensable aux scientifiques comme aux industriels ou aux militaires, chacun d'entre eux ayant une multitude de raisons d'observer la Terre.

Parmi les nombreuses sources de données existantes, l'imagerie par satellite offre l'avantage d'être synthétique, universelle et actuelle. En effet, le recul indispensable à une vision de synthèse qu'offrent les satellites d'observation fait de l'image satellite un outil inégalable pour surveiller notre planète. Elle n'est de plus limitée par aucune frontière qu'elle soit géographique ou politique ; ainsi n'importe quel endroit de la planète peut être imagé, même le plus inaccessible. Enfin, par l'actualité et la continuité des acquisitions, elle répond aux besoins liés à l'évolution rapide du monde, et à la demande d'informations toujours plus récentes. L'observation par satellite permet donc de réaliser la couverture de la Terre à la fois dans l'espace et le temps. Equipés de systèmes imageurs toujours plus performants, les satellites d'observation de la Terre scrutent quotidiennement notre planète, à l'image des satellites français de la filière SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) qui depuis 1986 ont déjà récolté plus de 10 millions d'images et représentent aujourd'hui encore une référence mondiale dans le domaine de l'imagerie satellitaire.

Bien que les principes de base restent identiques, la nouvelle génération de systèmes d'observation optique doit répondre à des besoins toujours plus nombreux et diversifiés, en tenant compte des progrès offerts par la technologie. Ainsi, la composante optique du programme franco-italien Pléiades, conçu à la fois pour succéder et compléter la filière SPOT, par sa résolution spatiale plus élevée mais une moindre surface de couverture, représente une importante avancée technologique en terme de réduction de poids : le satellite ne pèse que 900 kg contre 3 000 kg pour SPOT-5. L'instrument optique, de seulement 200 kg, contribue pour une grande part à cet allègement de masse notamment par sa structure très compacte. Cette compacité dans l'architecture optique du télescope n'est rendue possible que grâce à l'utilisation d'un composant clé, réalisant la fonction de sélection spectrale tout en présentant une structure intégrée: le « filtre allumette ». Ce composant offre des performances prometteuses en permettant une augmentation du nombre de bandes spectrales d'observation, augmentant d'autant la richesse en information spectrale, ce qui permet de répondre aux besoins toujours plus nombreux identifiés pour les missions futures. Cependant la technologie actuelle utilisée pour la fabrication de ces filtres, dont le risque d'échec est croissant avec le nombre de bandes, ne sera alors plus adaptée. Afin de pallier cette difficulté, il est donc nécessaire de mettre en place de nouvelles voies technologiques pour la fabrication de ces composants. C'est là tout le sujet de cette thèse, menée en partenariat entre l'Institut Fresnel et la société CILAS.

Tout d'abord, dans un premier chapitre, ces composants essentiels que sont les filtres allumettes sont présentés dans leur contexte, ainsi que par leurs principales caractéristiques géométriques et optiques. Le procédé de fabrication actuel, mettant en œuvre des technologies de dépôt et de structuration de couches minces optiques, est présenté au travers de ses principales étapes, permettant ainsi de mettre en avant les limites de cette technologie de réalisation.

Face à ces difficultés, le chapitre II propose alors une solution alternative, basée sur l'idée de réaliser ces composants par technologie d'assemblage. Différentes architectures sont alors envisageables, chacune imposant ses contraintes propres auxquelles s'ajoutent les contraintes dictées par l'environnement spatial, dont on étudiera alors l'influence sur le choix de la technologie d'assemblage, ainsi que sur la synthèse des empilements optiques. De même, différentes solutions d'assemblages seront alors étudiées afin d'identifier celles qui sont les mieux adaptées à notre application. Ce chapitre II fournit donc les éléments de réflexion nécessaires pour la conception de filtres allumettes par technologie d'assemblage.

La validation d'un concept ne pouvant se faire que par une mesure des performances du composant conformes aux attentes, et compte tenu de la géométrie très particulière des filtres allumettes, nous avons été amenés à développer un banc de métrologie optique spécifique. Le développement de cet outil de caractérisation à l'Institut Fresnel fera l'objet du chapitre III.

Tous ces éléments seront alors utilisés dans le chapitre IV dans lequel est détaillée la réalisation par technologie d'assemblage de deux filtres allumettes prototypes. Ces travaux ont fait l'objet d'un contrat d'étude passé entre l'ESA et la société CILAS, dans le cadre du programme de pré-développement GMES-Sentinel2. Les résultats obtenus avec ces prototypes, tant sur les plans optique que mécanique, ont permis de valider la solution technologique retenue.

Enfin, un dernier chapitre ouvre des perspectives en proposant l'idée de la réalisation de ces composants par une technologie de transfert d'empilement multicouches. Les différentes étapes nécessaires à cette solution novatrice seront étudiées et présentées au travers de premiers résultats de tests préliminaires.

A la suite de ces perspectives viendront s'ajouter les conclusions sur l'ensemble du travail présenté.

Remarque importante :

Pour des raisons de confidentialité industrielle, les caractéristiques constitutives des filtres optiques interférentiels présentés dans le corps de ce mémoire de thèse (telles que nature des matériaux, formules détaillées des empilements ou épaisseurs mécaniques résultantes) seront systématiquement omises. Seules seront présentées les performances optiques théoriques ou mesurées. Il nous semble toutefois important de préciser ici que le nombre de couches des fonctions optiques étudiées excèdent en général la centaine, et peut même, dans certains cas, dépasser 150.

Chapitre I.

Contexte

L'objectif de ce chapitre est ici de présenter les filtres allumettes, dans leur contexte d'une part, mais également au travers des caractéristiques géométriques et optiques qui font leur spécificité d'autre part. Après un état de l'art des technologies de dépôt et de structuration de couches minces optiques, on s'intéressera au principe du procédé de fabrication actuel, et plus particulièrement aux limites technologiques que celui-ci impose.

I. Imageur multispectral embarqué sur satellite défilant

Un imageur multispectral se compose d'un télescope qui réalise l'image d'une scène sur un détecteur, placé dans le plan focal et qui possède dans son architecture optique un élément permettant de partager le faisceau reçu en plusieurs bandes spectrales [1].

I.1. Modes d'acquisition d'une image

L'acquisition d'images peut s'effectuer au moyen d'un détecteur unique. Un miroir balaye mécaniquement de part et d'autre la scène observée, de manière généralement perpendiculaire au déplacement du satellite. Simultanément, le mouvement du satellite par rapport à la Terre assure le balayage dans la seconde dimension de l'image. La lumière collectée par le miroir est réfléchiée vers le détecteur qui réalise alors l'acquisition des données pixel après pixel (Figure 1). Ce mode d'acquisition est appelé *whiskbroom* [2].

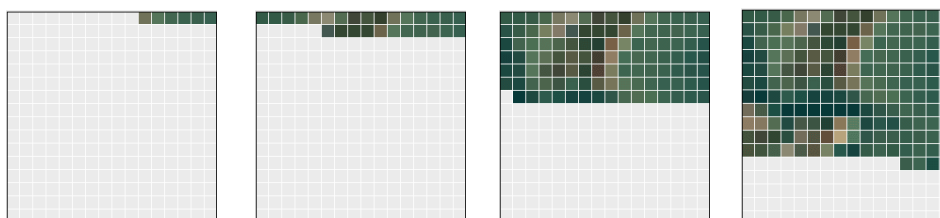


Figure 1 : Exemple d'acquisition d'image en mode « whiskbroom »¹.

Le balayage mécanique transverse permet d'élargir la zone couverte sur la surface de la Terre, mais il implique l'utilisation de moteurs et d'actionneurs fonctionnant sous vide. Ces

¹ <http://earthobservatory.nasa.gov>

mécanismes augmentent le coût et la complexité des systèmes. Ils sont de plus sujets à l'usure, ce qui limite par conséquent leur fiabilité et leur durée de vie. Mais surtout ils augmentent la taille, le poids et la consommation d'énergie, qui sont des facteurs de première importance pour les systèmes spatiaux. De plus, le temps d'intégration pour chaque pixel est très court, ce qui conduit à de faibles résolutions et rapport signal à bruit [4].

Pour remédier à ces problèmes, l'idée est d'utiliser une barrette linéaire de détecteurs alignée perpendiculairement au déplacement du satellite, on parle alors d'acquisition en mode *pushbroom*. Cette configuration permet ainsi de couvrir une zone relativement étendue sur la surface de la Terre sans nécessiter de balayage mécanique [5]. L'acquisition de la scène observée s'effectue alors ligne par ligne au cours du défilement du satellite (Figure 2). Le temps d'intégration de chaque pixel est donc augmenté ce qui a pour effet d'améliorer notamment le rapport signal à bruit du système.

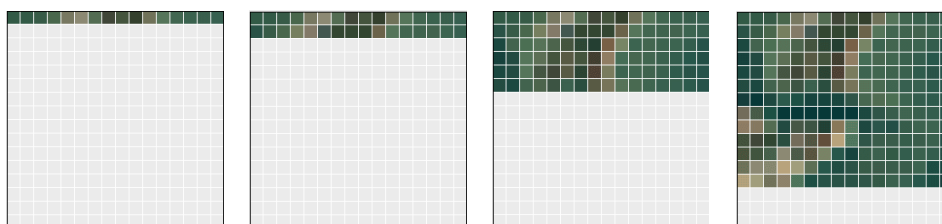


Figure 2 : Exemple d'acquisition d'image en mode « pushbroom »¹.

Ce mode d'acquisition d'images présente cependant des défauts, parmi lesquels on citera la variation de sensibilité d'un détecteur à l'autre qui rend alors particulièrement complexe la calibration du système. Malgré cela, la tendance actuelle pour les capteurs spatiaux est clairement orientée vers les capteurs *pushbroom*.

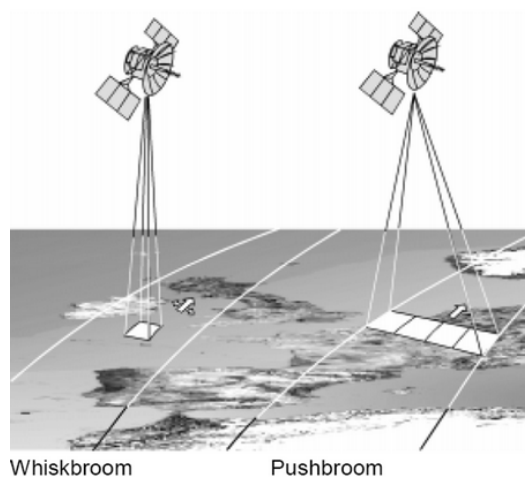


Figure 3 : Modes d'acquisition d'images [3].

I.2. Sélection spectrale dans le champ par filtre allumette

Afin de pouvoir extraire un maximum d'informations des images, on réalise des acquisitions sur plusieurs bandes spectrales. Il existe différentes manières de réaliser la fonction de séparation spectrale. On distingue 3 familles de séparateurs spectraux selon qu'ils sont basés sur des éléments dispersifs (prisme, réseaux), sur des filtres (interférentiels ou absorbants), ou des spectromètres à transformée de Fourier [3]. Le choix du séparateur spectral est dicté entre

autres par les besoins propres de la mission, mais également par les contraintes imposées par l'architecture globale de l'instrument d'observation.

En particulier, les télescopes de type TMA (Three Mirror Anastigmat) offrent une bonne qualité d'image, avec notamment une bonne planéité du plan image et des aberrations particulièrement faibles, sur un large champ de vision, le tout dans un volume instrumental réduit du fait du repliement important de cette combinaison optique (Figure 4). Cette configuration de télescope est donc particulièrement bien adaptée au mode d'acquisition d'images par balayage *pushbroom*. Cependant, par sa structure-même, purement réfléchissante, elle ne permet pas de compenser les aberrations chromatiques qu'engendre l'insertion des séparateurs spectraux. En effet, dans une telle configuration l'épaisseur de verre qui peut être introduite sur le chemin optique est limitée. Afin de conserver la qualité image du système, il faut donc pouvoir séparer les différentes bandes spectrales directement dans le champ de l'instrument [6]. Ceci revient donc à imager différentes zones de la surface terrestre, chacune dans une bande spectrale donnée.

Dans une configuration d'acquisition d'images de type *pushbroom*, les détecteurs sont des barrettes linéaires, et sont constitués d'autant de lignes de détections que de bandes spectrales envisagées, la sélection spectrale se faisant suivant les différentes lignes de détection [7].

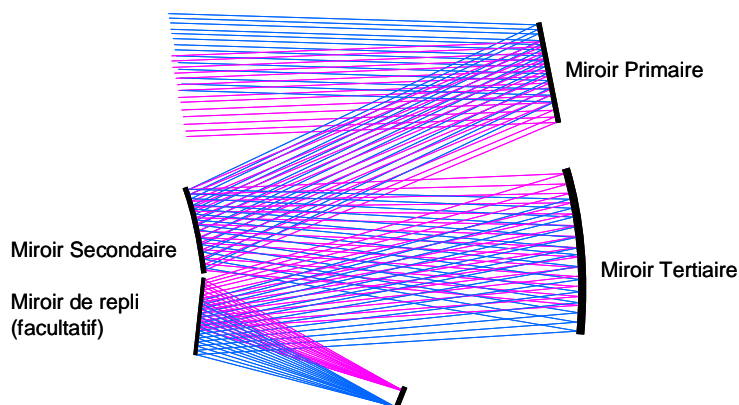


Figure 4 : Exemple de schéma de principe d'un télescope de type TMA.

La première idée qui vient alors à l'esprit serait de déposer des filtres passe-bande directement sur les lignes du détecteur. Cette solution radicale permettrait de s'affranchir de toute lumière parasite, mais elle est considérée comme trop risquée, notamment parce qu'elle combine différents procédés technologiques, optiques et électroniques, avec un risque de faible rendement de fabrication, voire une incompatibilité de ces procédés entre eux. Pour pouvoir maximiser ce rendement, il est donc préférable de réaliser les fonctions de filtrage optique sur un substrat indépendant puis de venir rapporter ce substrat sur la fenêtre du détecteur de manière à en être le plus proche possible afin de minimiser la lumière parasite dans le système. De tels filtres, qui permettent de séparer les différentes bandes spectrales le long des lignes du détecteur sont appelés filtres allumettes, du fait de leur géométrie qui découle directement du mode d'acquisition par balayage *pushbroom* du satellite.

Cette technologie de sélection spectrale a été mise en œuvre sur plusieurs programmes d'observation, parmi lesquels on peut citer la mission « Pléiades », sous le développement du CNES. Pléiades est la composante optique du système dual d'observation de la Terre à résolution métrique ORFEO développé en coopération avec l'Italie et dont le lancement du premier satellite est prévu début 2010. L'instrument Pléiades-HR est conçu afin de satisfaire à la fois des besoins civils et militaires, avec notamment des applications d'une part de défense et de sécurité civile et d'autre part de cartographie à des échelles meilleures que celles

accessibles aux satellites de la famille SPOT. L'architecture optique choisie pour le télescope est une combinaison TMA de type Korsch [8] et les images sont acquises par balayage *pushbroom*. Il combine un mode d'acquisition panchromatique et un mode multispectral dans 4 bandes: bleu, vert, rouge et proche infrarouge, dont la sélection s'effectue par un composant filtre allumette intégré au sein du plan focal [9].

II. Spécifications d'un filtre allumette

Les filtres allumettes sont des composants assurant la sélection spectrale au sein d'un imageur embarqué sur satellite défilant, réalisant l'acquisition des images en configuration *pushbroom*. Les spécifications des filtres allumettes sont donc dépendantes à la fois de la structure de l'imageur, mais également des applications de la mission du satellite.

II.1. Géométrie

Les filtres allumettes se plaçant juste devant le détecteur, leur géométrie est donc directement dictée par la géométrie de l'unité de détection.

II.1.1. Plan focal

Le module de détection se compose de 2 éléments principaux : le plan focal ou FPA (Focal Plane Assembly) qui assure la sélection spectrale dans le champ de l'instrument et transforme le signal optique d'entrée en un signal électrique, et l'électronique associée au détecteur qui réalise l'interface entre le FPA et la chaîne électronique embarquée à bord du satellite.

Le choix du dispositif de détection se résume généralement dans notre cas aux détecteurs à transfert de charge ou CCD (Charge-Coupled Device), pour la maturité de cette technologie et ses performances adéquates aux missions d'observation de la Terre. Du fait de l'utilisation du mode *pushbroom* pour l'acquisition des images, le détecteur se présente sous la forme de barrettes linéaires dont les paramètres sont optimisés pour répondre au mieux aux différentes contraintes imposées entre autres par la mission elle-même, l'environnement, l'interfaçage, etc....[10].

De manière générale, la structure du FPA consiste donc en plusieurs CCD, mis bout à bout, composés d'autant de lignes de détection parallèles que l'on souhaite de bandes spectrales d'observation. Devant chacune de ces lignes vient se placer un filtre allumette. La taille du FPA est liée à la taille du pixel élémentaire, qui fixe directement la largeur géométrique de chaque ligne de détection, et dont le nombre détermine la longueur. L'espacement entre le centre de chacune des lignes est quant à lui défini afin notamment de disposer de la place nécessaire pour la lecture des registres (Figure 5).



Figure 5 : Photographie du dispositif de détection à 4 bandes de l'instrument PLEIADES-HR [11].

II.1.2. Dimensions typiques

Le composant filtres allumettes est intégré au sein du FPA directement devant le détecteur, et présente donc une géométrie comparable. Les dimensions de chacun des filtres sont directement issues des dimensions de la ligne de détection qui leur est associée. Typiquement les bandes présentent des longueurs de plusieurs centimètres, et l'espacement entre le centre de 2 bandes voisines peut être réduit jusqu'au millimètre. Leur largeur géométrique est quant à elle déterminée par la taille du pixel élémentaire, en prenant en compte la définition du faisceau optique fixée par le télescope ainsi que la distance entre le filtre et le détecteur ce qui aboutit à des largeurs de bandes typiques de quelques centaines de microns. Les dimensions extérieures du composant sont quant à elles directement fixées par l'interfaçage avec le détecteur. Pour donner un rapide aperçu, la Figure 6 présente le composant filtres allumettes, à 4 bandes, de la mission PLEIADES-HR du CNES, intégré sur le détecteur présenté précédemment.

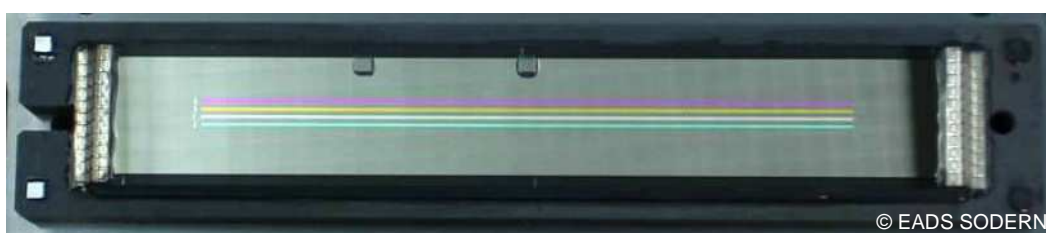


Figure 6 : Photographie du FPA intégré à 4 bandes de l'instrument PLEIADES-HR [11].

Le composant filtres allumettes est collé directement sur la fenêtre du détecteur avec des contraintes de propreté très strictes et une précision de positionnement absolu par rapport aux lignes détectrices inférieure à une dizaine de microns. Ce collage doit en outre apporter au système une étanchéité aux particules de taille supérieures à quelques microns.

En résumé, les spécifications géométriques des filtres allumettes, en termes de dimensions typiques, sont données dans le Tableau 1.

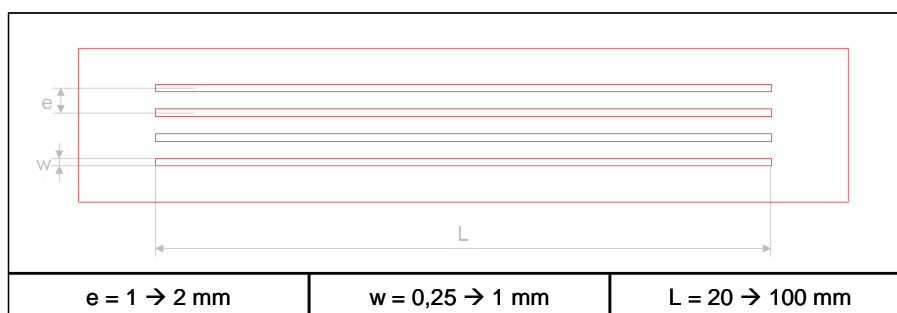


Tableau 1 : Dimensions typiques d'un composant filtres allumettes.

Concernant l'épaisseur du composant, celle-ci est dictée d'une part par l'interfaçage mécanique pour l'intégration dans le plan focal, et d'autre part par la structure de l'instrument qui ne tolère l'insertion d'une épaisseur de verre que de typiquement quelques millimètres.

II.2. **Fonction de filtre à bande étroite**

Dans les bandes d'observation, généralement notées bandes Bi ou XS selon la mission, les fonctions optiques à atteindre en termes de filtrage spectral sont dépendantes des applications du programme d'observation dans lequel est utilisé le composant.

II.2.1. Bandes spectrales d'observation

Le choix des bandes spectrales d'observation est propre à chaque mission. En effet, il s'agit de définir les bandes, notamment en termes de centrage et de largeur spectrale, pour qu'elles soient adaptées au mieux aux objectifs de la mission.

Certaines bandes sont définies directement en rapport avec ce qui doit être observé. Ainsi, il peut être choisi de centrer une bande spectrale sur la longueur d'onde de 665 nm correspondant à la longueur d'onde d'absorption maximale de la chlorophylle. Ainsi les images acquises dans cette bande spectrale pourront permettre notamment une identification de la présence végétale. D'autres longueurs d'onde d'observation sont choisies pour être utilisées en tant que référence ou facteur correctif. Par exemple, une bande spectrale centrée sur 1375 nm permettra une correction atmosphérique en détectant les nuages fins de type cirrus. De même, la largeur spectrale de chacune des bandes est définie en fonction des besoins. Elle peut être réduite pour limiter l'influence de certains constituants présents dans l'atmosphère, ou ajustée en fonction du spectre de l'élément que l'on souhaite mettre en avant [12].

Les longueurs d'onde d'observation sont définies pour pouvoir être combinées afin d'en extraire les informations recherchées. En effet, selon la combinaison choisie de longueurs d'onde, on peut alors montrer des caractéristiques différentes dans le paysage, ce qui permet notamment une classification plus précise des éléments observés. La Figure 7 nous présente un exemple basé sur la simulation d'une image (à gauche) de laquelle on extrait, par combinaison de longueurs d'onde, plusieurs aspects relatifs à la couverture végétale de la zone imagée.

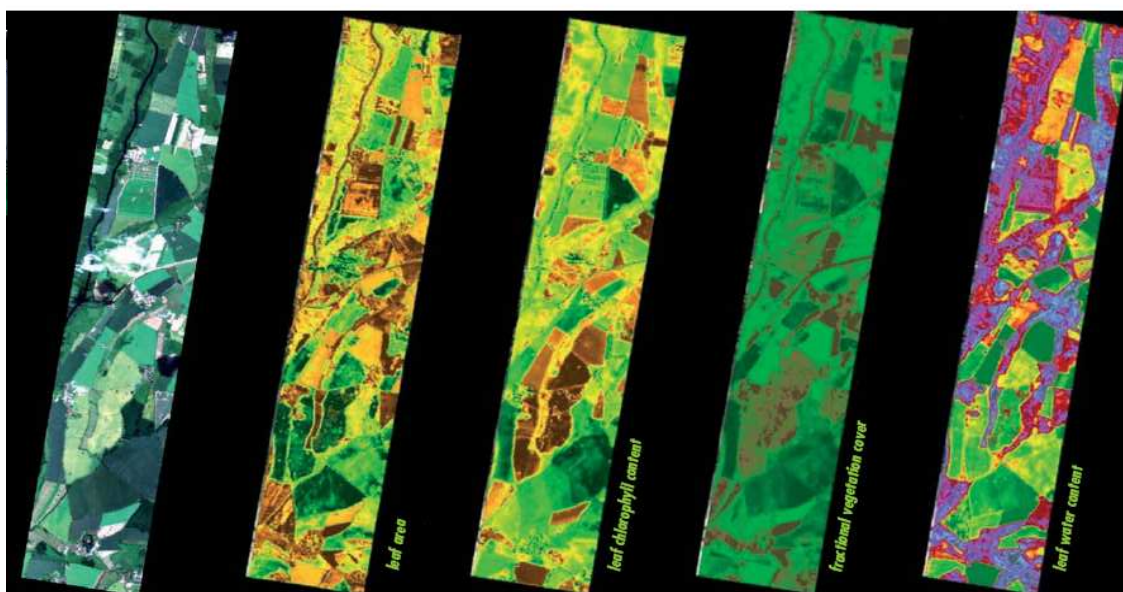


Figure 7 : Quatre exemples de caractéristiques typiques extraites de la simulation d'une image Sentinel-2 (à gauche)².

Fréquemment, il existe en plus du mode d'acquisition multispectral un mode panchromatique qui permet l'acquisition d'images avec une haute résolution spatiale par intégration de la lumière sur une large gamme spectrale. Les images panchromatiques contiennent donc une grande quantité d'informations spatiales, et sont particulièrement adaptées pour des applications de cartographie à moyenne échelle et d'étude des milieux urbains. Les images

² ESA Bulletin 131 (08/2007), Philippe Martimort et al., « Sentinel-2: The Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Service ».

multispectrales quant à elles apportent l'information spectrale pour des applications particulières de cartographie à plus petite échelle comme l'étude de l'occupation des sols [13].

Il est possible de fusionner une image panchromatique à haute résolution spatiale avec une image de plus basse résolution spatiale obtenue avec une, ou plusieurs, voies multispectrales. L'image résultante gardera les propriétés spectrales de l'image de basse résolution tout en intégrant les détails spatiaux de l'image de haute résolution [14]. Cette fusion permet ainsi d'obtenir des images résolues à la fois spatialement et spectralement (Figure 8).



Figure 8: Exemple de la fusion d'une image panchromatique avec une image multispectrale (© Université Libre de Bruxelles).

II.2.2. Performances attendues

Les spécifications spectrales auxquelles doit répondre chacun des filtres des différentes bandes sont définies dans le domaine spectral correspondant au domaine de sensibilité du détecteur. Pour les applications concernant les filtres allumettes, le domaine spectral d'intérêt s'étend typiquement du visible au proche infrarouge. La technologie de détection étant différente sur l'ensemble de ce domaine spectral, on distinguera alors deux sous-domaines : le domaine VNIR (Visible and Near Infra Red), et le domaine SWIR (Short Wavelength Infra Red).

Les performances principales attendues pour les filtres concernent la longueur d'onde de centrage, la largeur de la bande passante, la valeur de transmission dans la bande passante et ses fluctuations admissibles, la valeur de transmission hors bande passante, ainsi que la raideur des flancs. Toutes ces caractéristiques peuvent bien évidemment être spécifiées au travers de diverses formulations.

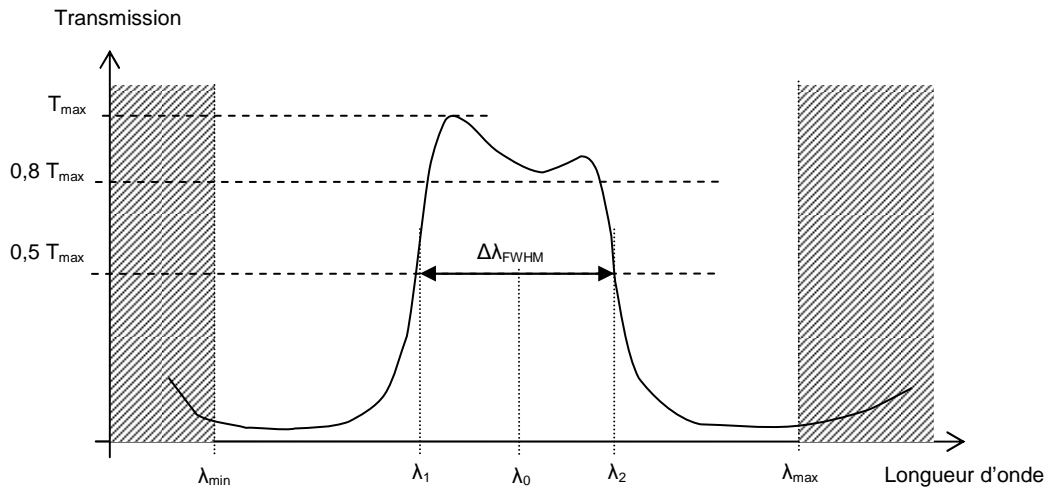


Figure 9 : Définition des paramètres spectraux.

Généralement, le centrage et la largeur de bande sont définis à partir des longueurs d'onde λ_1 et λ_2 pour lesquelles la valeur de transmission est égale à 50 % de la transmission maximale dans le domaine spectral d'intérêt, comme illustré sur la Figure 9 :

$$T(\lambda_1) = T(\lambda_2) = 0,5 T_{\max} \quad (1)$$

La longueur d'onde de centrage se définit alors comme la longueur d'onde moyenne entre les 2 longueurs d'onde à mi-hauteur :

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \quad (2)$$

Typiquement, elle doit avoir une stabilité de l'ordre de quelques nanomètres. La largeur spectrale quant à elle se définit comme la largeur à mi-hauteur ou FWHM (Full Width at Half Maximum) :

$$\Delta\lambda_{FWHM} = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (3)$$

Typiquement, les valeurs de largeurs de bande sont de quelques dizaines jusqu'à une centaine de nanomètres, avec une stabilité de l'ordre de quelques nanomètres.

Les oscillations dans la bande passante du filtre doivent également être limitées. On considère alors fréquemment une spécification précisant la borne minimale à laquelle la réponse spectrale du filtre entre certaines longueurs d'onde doit toujours être supérieure.

De plus, la lumière doit être bloquée en dehors de la bande passante, sur toute la gamme spectrale de sensibilité du détecteur. On définit couramment la réjection comme le rapport entre l'énergie intégrée dans la bande du filtre sur l'énergie intégrée sur tout le domaine spectral d'intérêt. On notera que l'étendue spectrale des bandes de réjection est en général très large par rapport aux bandes passantes, ce qui impose des taux de transmissions très bas en dehors de la bande passante sans quoi le flux parasite devient rapidement important par rapport au flux utile intégré dans la bande passante.

Ces spécifications d'oscillations et de réjection peuvent être définies pour la réponse spectrale complète de la voie considérée, c'est-à-dire en prenant en compte, en plus du profil de transmission du filtre, la réponse spectrale complète de l'instrument comprenant les différents éléments optiques (miroirs du télescope, séparateur,...) et la sensibilité du détecteur, ainsi que le profil spectral de luminance de l'objet observé, dans notre cas : la Terre. Cette réponse spectrale complète permet d'estimer le profil spectral effectivement détecté dans chacune des bandes. Les niveaux de transmission à atteindre, dans les bandes de transmission comme dans les bandes de réjection peuvent alors être différents d'une bande spectrale à l'autre

En résumé, les filtres doivent avoir des performances précises à quelques nanomètres près concernant le centrage et la largeur de bande, celle-ci étant de typiquement quelques dizaines à une centaine de nanomètres. Ils doivent également présenter des taux de réjection importants sur de larges domaines spectraux.

Des profils typiques de filtres passe-bande sont présentés sur la Figure 10, il s'agit dans cet exemple des filtres de l'instrument Pléiades-HR.

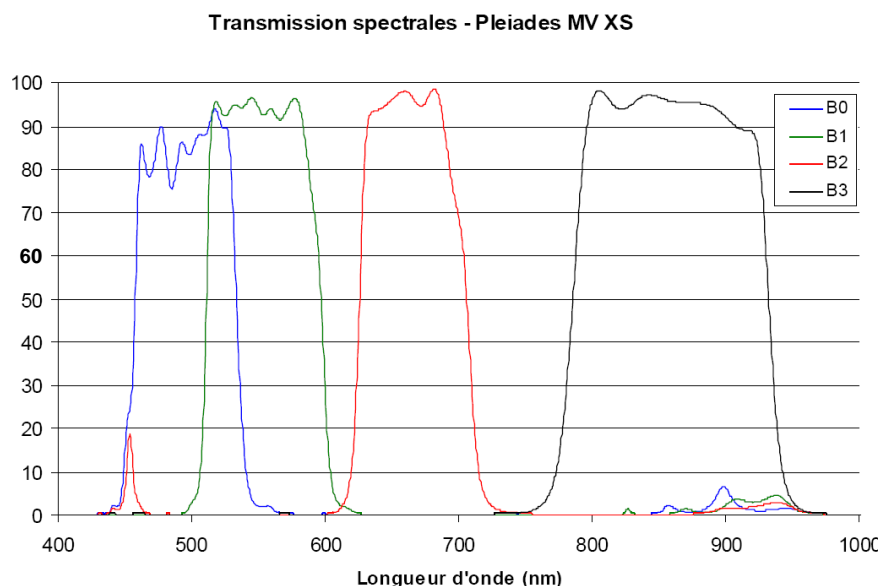


Figure 10 : Exemples de profils spectraux de filtres (instrument PLEIADES-HR).

La diversité et la complexité de ces fonctions optiques, et notamment les précisions requises en terme de réponse spectrale, ainsi que la tenue à l'environnement spatial, rendent l'utilisation de polymères colorés déposés directement sur les pixels (comme c'est notamment le cas pour les caméras couleur RVB grand public) non adaptée. En effet, les caractéristiques spectrales de ceux-ci ne sont pas suffisamment flexibles et ils possèdent en outre de piètres taux de réjection. De plus, leur réponse spectrale en environnement spatial n'est pas stable et tend à se dégrader avec le temps. Les spécifications spectrales des filtres allumettes imposent donc la réalisation de ces fonctions optiques par empilements multicouches interférentiels, ce qui permet en outre de garantir la stabilité des filtres en environnement spatial, ce procédé ayant déjà été qualifié.

On notera cependant que le nombre de couches alors nécessaire à la réalisation de ces fonctions optiques complexes est relativement élevé, pouvant dépasser la centaine, et que ces empilements doivent en outre être structurés géométriquement. De plus du fait de la proximité du détecteur, les contraintes de cosmétique du composant sont strictes, le moindre défaut local pouvant engendrer une dégradation des performances du pixel placé juste derrière. Enfin, sachant que les propriétés optiques d'un empilement interférentiel sont directement liées aux

épaisseurs des couches, il devient impératif d'avoir une excellente uniformité d'épaisseur des dépôts sur toute la longueur de l'allumette si l'on veut garantir les performances spectrales, centrage et largeur de bande, en tout point. La réalisation de ces empilements reste donc particulièrement complexe.

II.3. Fonction d'absorbeur

Afin de délimiter les bandes spectrales et empêcher la lumière directe d'atteindre le détecteur, les voies sont séparées par des fonctions absorbeurs, qui sont définies de manière à minimiser la lumière parasite dans le système.

II.3.1. Diaphonie

Il apparaît dans le système un phénomène de diaphonie entre les voies : une partie de la lumière de la voie B_i est détectée sur la ligne de détection B_{i+1} . Ce phénomène de diaphonie provient d'une part des réflexions sur le substrat et d'autre part des réflexions sur la surface du détecteur dont le coefficient est directement dépendant de la structure de ce dernier. Pour une réflexion verre-air sur le substrat, le coefficient de réflexion est de l'ordre de 4 %. Sur les filtres, du fait des forts taux de réjection, le coefficient de réflexion est proche de 100 % en dehors de la bande passante du filtre, ce qui correspond à une large gamme spectrale.

Ce phénomène de diaphonie engendre une dégradation des performances de séparation spectrale du composant qu'il convient de limiter au maximum. Pour minimiser les retours de lumière vers le détecteur, un traitement absorbant est placé sur la face arrière du composant (côté détecteur) permettant ainsi d'éviter que la lumière réfléchie sur le détecteur soit à nouveau réfléchie ou traverse le substrat. On minimise ainsi les réflexions parasites en direction du détecteur (Figure 11).

Réflexions sur le détecteur

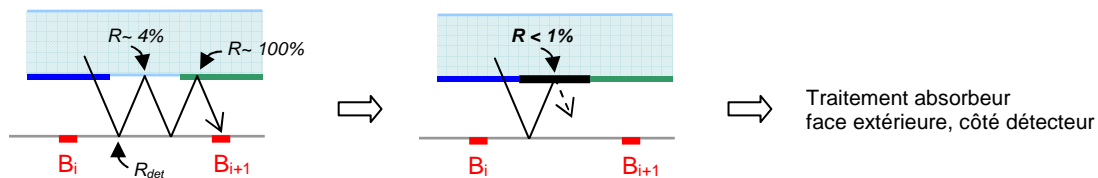


Figure 11 : Solution pour limiter la diaphonie due aux réflexions sur le détecteur.

De la même manière, pour les réflexions internes dans le substrat, on choisit de déposer entre les bandes des absorbeurs de lumière minimisant cette fois les réflexions parasites dans le verre à l'intérieur du substrat et non plus dans l'air comme précédemment (Figure 12).

Réflexions internes dans le verre

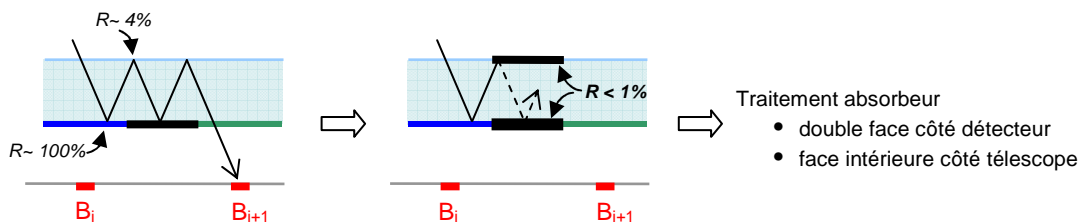


Figure 12 : Solution pour limiter la diaphonie due aux réflexions internes dans le substrat.

En résumé, pour limiter le phénomène de diaphonie, les différentes voies du composant sont séparées par des absorbeurs de lumière « double face » sur la face arrière (côté détecteur) permettant de minimiser les réflexions dans le verre et dans l'air, et sur la face avant (côté télescope) d'un absorbeur limitant les réflexions dans le verre. Selon la configuration de l'instrument, il peut être demandé sur la face avant du composant un absorbeur double face, permettant ainsi d'éviter les réflexions sur les différentes optiques du télescope placé en amont, ou bien une structure de type miroir qui limite la lumière entrant dans le système, contribuant ainsi à réduire ces phénomènes de lumière parasite tout en évitant une éventuelle élévation de température du composant due au phénomène d'absorption.

II.3.2. Structure des absorbeurs

Comme dans le cas des filtres passe-bande, les fonctions absorbeur sont réalisées par des traitements interférentiels multicouches, permettant notamment de garantir la tenue à l'environnement spatial. La fonction absorbeur est obtenue à l'aide d'empilements métal – diélectrique, permettant de minimiser à la fois le facteur de transmission et de réflexion : la transmission est annulée par le dépôt d'une couche métallique opaque, d'épaisseur supérieure à typiquement 150 nm, alors que la réflexion quant à elle est diminuée par un empilement de couches diélectriques et métalliques semi-transparentes, d'épaisseur inférieure à une dizaine de nanomètres. On peut ainsi atteindre de très bons niveaux d'absorption (> 99 %), conjointement à de faibles niveaux de réflexion, sur un large domaine spectral [15]-[17]. Les performances d'un traitement absorbeur large bande réalisé à l'Institut Fresnel sont présentés sur la Figure 13. On notera que ces empilements ont un nombre de couches réduit par comparaison aux filtres passe-bande, moins d'une dizaine dans le cas de l'exemple ci-dessous.

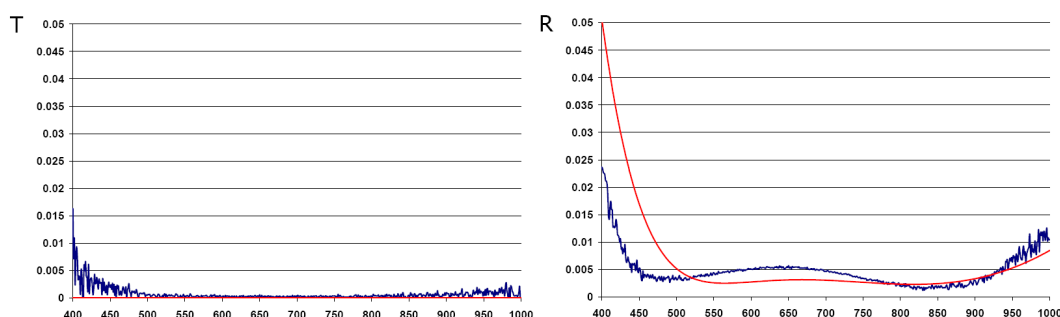


Figure 13 : Comparaison entre les profils expérimentaux (en bleu) et théoriques (en rouge) de transmission et de réflexion d'un absorbeur large bande.

Les spécifications de ces absorbeurs sont fortement dépendantes des missions, et de la structure globale du composant. Typiquement, pour un traitement absorbant, il peut être demandé, par exemple, une transmission inférieure à 10^{-3} et une réflexion inférieure à quelques pourcents sur l'ensemble du domaine spectral d'intérêt.

De plus, afin de laisser passer la lumière au niveau des bandes, ces traitements doivent être structurés. En effet, ce sont les ouvertures réalisées dans les absorbeurs qui définissent les dimensions géométriques des bandes, leur mise en forme spatiale est donc particulièrement critique.

III. Etat de l'art

Les fonctions optiques des filtres allumettes sont réalisées au moyen de traitements interférentiels multicouches. Tout d'abord, il convient alors de réaliser la synthèse de l'empilement à déposer, puis de procéder à sa réalisation et à sa structuration afin de lui donner la géométrie désirée.

III.1. Synthèse d'empilements multicouches interférentiels

La synthèse d'un empilement multicouche consiste à déterminer sa formule, nombres de couches et épaisseurs, afin de répondre à des spécifications données. Il s'agit en général d'atteindre des propriétés optiques, principalement en termes de réponse spectrale en réflexion et en transmission, parfois en absorption.

III.1.1. Spécifications de départ

Cette synthèse doit prendre en compte dès le début toutes les spécifications des traitements, y compris les performances non optiques requises en termes, par exemple d'environnement mécanique ou climatique. En effet, ces spécifications orientent le choix des matériaux et de la technologie de dépôt.

Les 3 paramètres que sont les matériaux, la technologie de dépôt, et la formule de l'empilement, ne sont pas complètement indépendants (Figure 14).

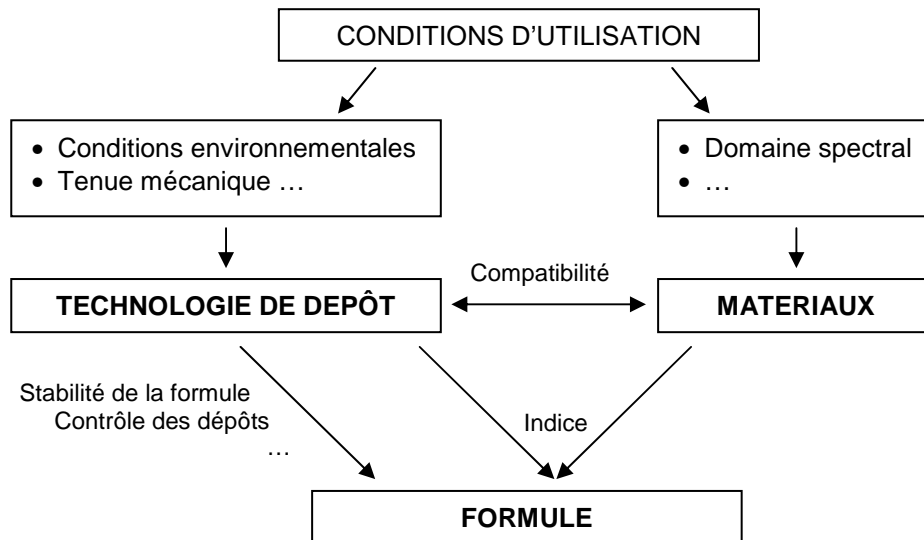


Figure 14 : Prise en compte des conditions d'utilisations des traitements dans les hypothèses de départ.

En effet, le domaine spectral d'utilisation des traitements limite la gamme de matériaux disponibles, ceux-ci devant être, dans une grande majorité des cas, transparents aux longueurs d'onde d'intérêt. Il faut également s'assurer de la compatibilité des matériaux choisis entre eux. De plus, ces derniers imposent les indices, données d'entrée indispensables pour la synthèse des empilements. Ceux-ci dépendent également de la technologie de dépôt, dont le choix est principalement orienté par les conditions d'utilisation des traitements, telles que les conditions environnementales. Cette dernière pose également des limites sur, entre autres, le nombre de couches ou la stabilité de l'empilement.

Pour la plupart des applications, on considère un couple de matériaux ayant le rapport d'indice le plus fort. Il est également possible de réaliser des empilements à 3 matériaux ou plus pour atteindre des fonctions spectrales particulières.

III.1.2. Couche quart d'onde

La brique de base pour la réalisation des fonctions optiques par empilement interférentiel est la couche quart d'onde. Par définition, son épaisseur optique est donnée par la formule suivante, dans laquelle λ_0 correspond à la longueur d'onde de centrage de la fonction optique :

$$ne = \frac{\lambda_0}{4} \quad (4)$$

On note habituellement les couches quart d'onde par une lettre majuscule en rapport avec leur indice : B, dans le cas du matériau de bas indice, et H, dans le cas du matériau de haut indice.

Un exemple de fonction optique simple, basée sur une structure quart d'onde, est le miroir diélectrique quart d'onde. Sa structure se compose d'une alternance de couches haut et bas indice :

Substrat / H B H B H B ... H B H / Milieu extérieur

Ces miroirs sont habituellement notés M_q , où q correspond au nombre de couches de l'empilement. Ce nombre de couches est principalement déterminé par la réflectivité que l'on souhaite atteindre, la largeur spectrale du miroir dépendant essentiellement du rapport d'indice entre les 2 matériaux.

La Figure 15 présente l'exemple d'un miroir quart d'onde à 13 couches, alternées SiO_2 et Ta_2O_5 , centré sur la longueur d'onde de 700 nm.

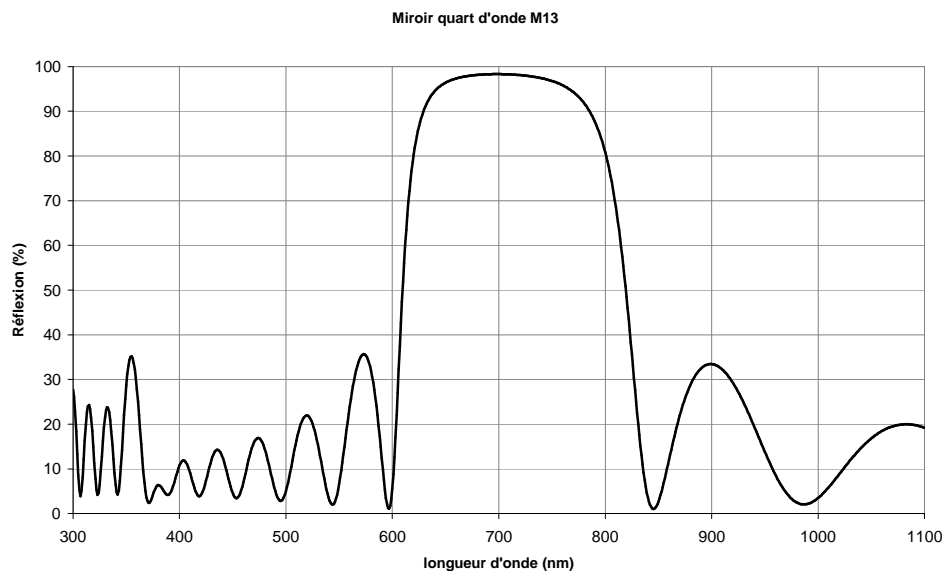


Figure 15 : Profil spectral d'un miroir quart d'onde.

III.1.3. Filtre passe-bande

Les filtres passe-bande constituent la fonction optique principale des composants filtres allumettes, c'est pourquoi quelques éléments relatifs à leur synthèse sont présentés ici.

Deux paramètres essentiels pour un filtre passe-bande sont sa longueur d'onde de centrage et sa largeur de bande. Une première approche pour réaliser une fonction de filtrage passe-bande consiste à associer deux filtres dichroïques passe-bas et passe-haut. Cependant, dans ce cas, les deux fonctions dichroïques doivent être centrées de manière extrêmement précise, le moindre décalage de l'une d'entre elles entraînant une variation à la fois du centrage mais également de la largeur de bande.

Pour la réalisation de filtres à bande passante étroite, on préférera alors un empilement basé sur une structure de type Fabry-Perot qui permet de garantir le centrage et la largeur spectrale avec une excellente précision. Celle-ci consiste en deux miroirs se faisant face de part et d'autre d'une cavité. Les miroirs sont réalisés à l'aide de miroirs quart d'onde, et séparés par une couche demi-onde simple ou multiple. La formule d'un filtre est donc de la forme suivante :

$$M_q \ 2kB \ M_q \ (\text{ou } M_q \ 2kH \ M_q), \text{ où } k \text{ est un entier (ordre de multiplicité de la demi-onde)}$$

Afin d'adapter le filtre aux spécifications initiales, notamment en terme de largeur de bande, on peut faire varier l'épaisseur de la cavité et/ou le facteur de réflexion des miroirs en modifiant leur nombre de couches, ce qui dans les deux cas influe également sur la réjection du filtre. Pour augmenter la raideur des flancs, on utilise des filtres passe-bande multicavités, constitués par la juxtaposition de plusieurs cavités Fabry-Pérot. Plus le nombre de cavités est important, plus les flancs du filtre sont raides, la bande passante restant sensiblement constante [18]. Cependant les bandes de réjection de ces filtres se limitent à la largeur spectrale des miroirs utilisés dans l'empilement, ce qui est beaucoup trop étroit pour des applications de type filtre allumette (Figure 16). Il faut alors les étendre au moyen de filtre(s) de blocage de type passe-bas, passe-haut, en veillant à ce que ces filtres dichroïques ne dégradent pas la bande passante du filtre.

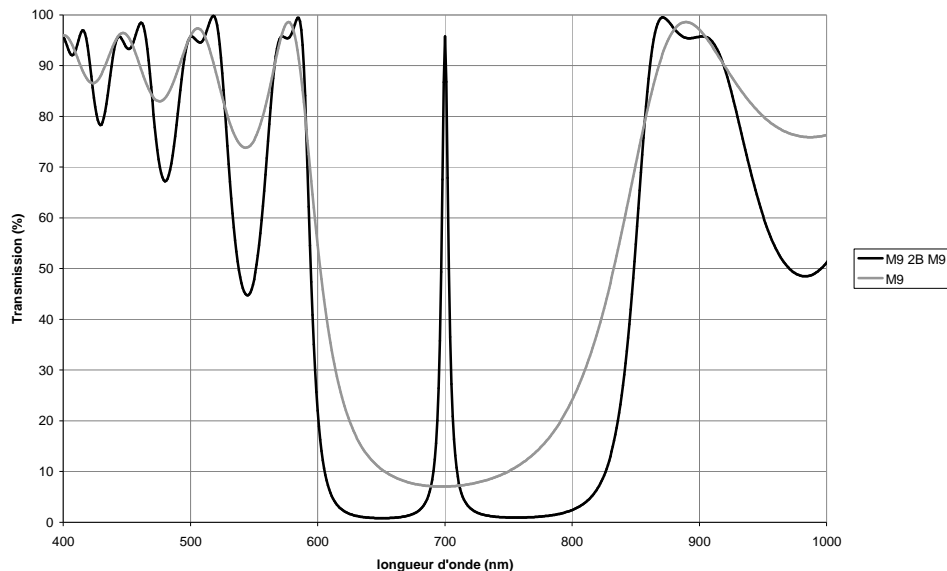


Figure 16 : Comparaison entre le profil spectral d'un filtre à 1 cavité et celui du miroir utilisé pour constituer la cavité.

Le contrôle des épaisseurs déposées pour chacune des couches est primordial pour obtenir le gabarit spectral recherché. Les bâtis de dépôt peuvent être équipés d'une microbalance à quartz dont la fréquence de vibration est directement liée à la quantité de matière reçue. Cependant pour des empilements aussi complexes que les filtres passe-bande, les méthodes de contrôle optique direct sont beaucoup plus adaptées. Leur principe repose sur l'évolution de

la transmission spectrale du composant au cours du dépôt. Ainsi elles donnent une vision en temps réel de la fabrication du composant, offrant des critères pour arrêter, corriger ou poursuivre le dépôt. De plus elles permettent une compensation des erreurs de dépôt à la longueur d'onde de contrôle. Leur efficacité est prouvée surtout sur les empilements passe bande de structure quart d'onde [19].

III.2. Technologies de dépôt

Les principales méthodes utilisées pour la réalisation de couches minces optiques sous vide font appel aux technologies de dépôt en phase vapeur chimique ou CVD (Chemical Vapor Deposition) et de dépôt en phase vapeur physique ou PVD (Physical Vapor Deposition). Dans notre cas, on ne s'intéressera qu'aux méthodes basées sur la technologie PVD.

Le principe général de ces technologies de dépôt de couches minces optiques consiste à évaporer ou pulvériser, dans une chambre à vide, un matériau de grande pureté vers un substrat.

III.2.1. Dépôt par évaporation

Le matériau à évaporer est déposé dans un creuset, le substrat étant placé en regard au dessus. Le dépôt se déroule en 3 étapes : tout d'abord, il y a évaporation du matériau, puis transfert en phase vapeur, et enfin condensation sur le substrat. On distinguera 2 procédés physiques pour évaporer le matériau : le chauffage par effet Joule et le bombardement par faisceau d'électrons ou EBD (Electron Beam Deposition). Les couches obtenues par cette technologie de dépôt présentent toutefois une microstructure poreuse qui engendre une sensibilité aux conditions environnementales, notamment au passage air-vide. En effet, du fait de leur microstructure lacunaire, l'humidité de l'air est adsorbée modifiant l'indice de la couche. Ceci se traduit au mieux par un décalage en longueur d'onde de la fonction optique. Cet inconvénient rend donc difficile l'utilisation de ce procédé de dépôt par évaporation classique pour des applications spatiales dans le cas de fonctions optiques complexes.

Afin de rendre les couches plus denses, une première solution consiste à les compacter au moyen d'un faisceau d'ions. Cette technologie d'évaporation assistée, appelée IAD (Ion Assisted Deposition), met en œuvre un canon à ions situé dans l'enceinte à vide et orienté vers le substrat, qui bombarde les couches en cours de dépôt. Une seconde solution pour densifier les couches obtenues par évaporation est le dépôt assisté par plasma ou IP (Ion Plating). Il s'agit alors de créer une différence de potentiel entre un plasma réparti dans la chambre à vide et le substrat, engendrant ainsi un bombardement ionique sur la couche en cours de dépôt. Il est également possible de combiner ces deux technologies, IAD et IP, on obtient alors la technologie APS (Advanced Plasma Source Ion Plating).

Ainsi avec ces technologies de dépôt par évaporation assistée, on obtient des couches denses, ne présentant plus d'adsorption d'eau et ayant une meilleure tenue mécanique. Ces technologies peuvent alors être utilisées dans le cas d'applications spatiales.

III.2.2. Dépôt par pulvérisation

Dans le cas du dépôt par pulvérisation, le matériau à déposer se présente sous la forme d'une cible, et peut être notamment pulvérisé à l'aide d'un plasma généré dans la chambre à vide. Il s'agit alors de créer une différence de potentiel entre une cathode sur laquelle est placée la cible, et une anode, souvent maintenue à la masse, qui sert généralement de porte-substrat. Dans la plupart des cas, ce procédé met en œuvre une cathode magnétron qui aura pour effet d'augmenter les taux de pulvérisation. Les couches obtenues par pulvérisation cathodique

magnétron (Magnetron Sputtering) présentent entre autres une forte densité ainsi que de bonnes propriétés mécaniques, et conviennent aux applications spatiales.

La pulvérisation du matériau à déposer peut également s'effectuer au moyen d'un faisceau d'ions, on parle alors d'IBS (Ion Beam Sputtering) : un canon à ions placé dans l'enceinte à vide et dirigé vers la cible, pulvérise le matériau vers le substrat placé à son voisinage. Une alternative à ce procédé peut être d'utiliser un second canon à ions, orienté vers le substrat, pour venir compacter les couches en cours de dépôt. Cette technologie de pulvérisation ionique assistée par faisceau d'ions, ou DIBS (Dual Ion Beam Sputtering), permet d'obtenir des couches particulièrement denses et de très bonne tenue mécanique, parfaitement adaptées aux applications spatiales.

Il existe d'autres procédés de dépôt de couches minces sous vide. Citons par exemple, le dépôt par laser pulsé qui consiste à ablater la cible de matériau à déposer par faisceau laser.

III.3. Procédés de structuration

Les empilements constituant les filtres allumettes, absorbeur ou filtre à bande étroite, doivent être structurés, afin d'obtenir la forme et les dimensions souhaitées. La réalisation de ces motifs peut s'effectuer suivant différents procédés, que l'on classera en deux familles : les procédés dits soustractifs et les procédés dits additifs. Dans le cas d'un procédé soustractif, l'empilement est déposé sur la totalité de la surface puis enlevé dans les zones non désirées ; dans le cas d'un procédé dit additif, l'empilement n'est déposé sur le substrat qu'à l'emplacement où il doit se trouver au final.

III.3.1. Procédés soustractifs

De manière générale, le principe d'un procédé soustractif peut se résumer en 3 étapes (Figure 17). Tout d'abord, l'empilement à structurer est déposé sur la surface. Puis par une étape de photolithographie, les motifs à réaliser sont définis, les zones à conserver restent alors protégées par la résine. Le traitement non protégé est ensuite attaqué, puis la résine restante retirée.

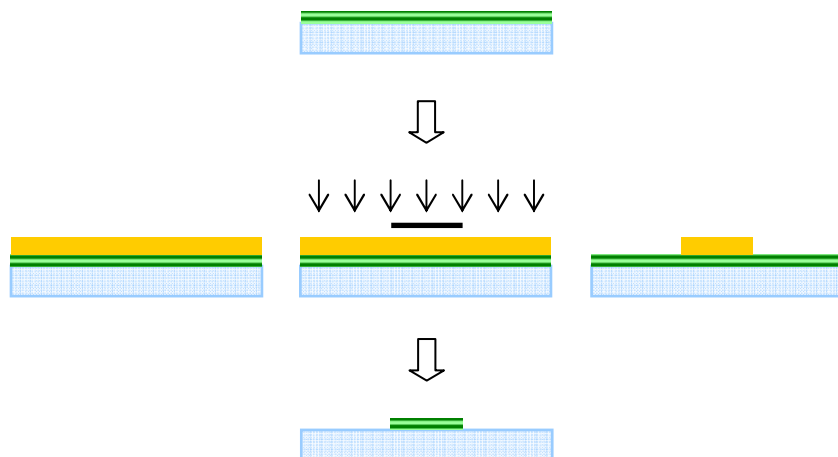


Figure 17 : Principe général d'un procédé de structuration soustractif (cas du masquage par photolithographie).

Parmi les différents procédés de structuration soustractifs, un des plus courants est la gravure humide. Il s'agit alors d'attaquer, par réaction chimique, le matériau à enlever. L'attaque peut être isotrope ou non, et plus ou moins sélective. Dans le cas d'un empilement multicouche, les agents d'attaque étant différents pour chacun des matériaux, les couches sont gravées les unes après les autres par immersion du composant alternativement dans chacune des solutions de gravure. La gravure chimique présente cependant le défaut de générer un phénomène de sous-gravure, ou gravure latérale, qui conduit à une dégradation de la géométrie des motifs.

Un autre procédé de structuration soustractif est la gravure sèche ou gravure par voie plasma. Le principe consiste alors à placer l'échantillon dans une chambre à vide, dans laquelle est créé un plasma ionisé. Les ions viennent alors bombarder le traitement, et le graver par effet mécanique. Ce procédé n'est cependant que peu utilisé du fait de sa faible sélectivité et de sa lenteur. Une alternative consiste à rendre le plasma réactif, pour qu'intervienne en plus du bombardement mécanique, une attaque chimique. La gravure ionique réactive ou RIE (Reactive Ion Etching) permet ainsi d'améliorer la sélectivité et la vitesse de la gravure [20]. Cependant du fait du bombardement ionique, la couche de résine protégeant l'empilement est elle aussi attaquée, limitant ainsi la profondeur de gravure et la taille de motif atteignable. Pour pallier ces défauts, un procédé, basé sur le même principe a été développé permettant d'atteindre des profondeurs de gravure et des facteurs de forme beaucoup plus importants, on parle alors de DRIE (Deep Reactive Ion Etching) [21].

Enfin, il existe également des procédés de structuration soustractifs par gravure laser. Dans ce cas, la définition du motif s'effectue par le déplacement relatif du faisceau par rapport au substrat. On s'affranchit alors des étapes de photolithographie. Le matériau est soumis à une impulsion de fluence dépassant son seuil d'ablation. La différence entre les seuils d'ablation des différents matériaux fixe la sélectivité de la gravure, par ajustement de la fluence. La qualité de motifs ainsi réalisés dépend principalement du type de laser utilisé [22].

III.3.2. Procédés additifs

De manière générale, le principe d'un procédé de structuration additif peut se résumer en 3 étapes. Tout d'abord, la mise en place d'un masquage permet de définir les motifs, en protégeant les zones du substrat où l'empilement ne doit pas être déposé. Le dépôt est ensuite effectué à travers le masque, puis ce dernier est retiré. L'empilement est donc déposé uniquement dans les zones ouvertes du masque.

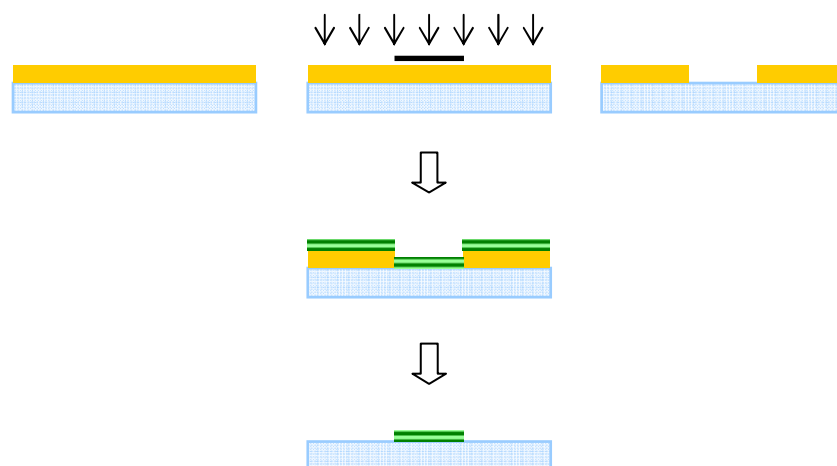


Figure 18 : Principe général d'un procédé de structuration additif (cas du masquage par photolithographie).

Le masque peut être réalisé par photolithographie, la résolution des motifs est alors fixée par la résolution photo-lithographique de la résine. Dans ce cas, le procédé, alors appelé *lift off*, débute par les étapes de dépôt de résine, d'insolation et de développement (Figure 18). La structuration de l'empilement se faisant de manière mécanique et non chimique, ce procédé présente entre autres l'avantage de permettre la structuration de matériaux qui ne peuvent être gravés chimiquement, ainsi que de pouvoir graver des dépôts sur des substrats sensibles aux attaques chimiques. Cependant, on notera que le retrait de la résine, ou opération de *lift off*, conduit à une rupture brusque du traitement pouvant engendrer une fragilisation face aux contraintes mécaniques ou environnementales.

Le masquage peut également s'effectuer au moyen d'un masque mécanique placé juste devant le substrat pendant le dépôt. Cependant du fait des risques liés notamment aux effets d'ombrage ou de débordement du traitement sous le masque, cette solution n'est pas adaptée pour la réalisation de motifs de très petites dimensions, ou avec une grande précision.

IV. Principe de fabrication monolithique

IV.1. Principales étapes

Il convient tout d'abord de définir le substrat. Sa nature est définie d'une part par ses propriétés optiques, il doit être transparent sur tout le domaine spectral d'intérêt, et d'autre part par ses propriétés mécaniques et thermiques, notamment en termes d'usinage, de polissage, mais également de coefficient d'expansion thermique ou de tenue aux radiations. Ses dimensions peuvent correspondre aux dimensions extérieures du composant final, ou être supérieures pour des facilités de manipulation et d'outillage. Dans ce cas, une étape de découpe doit alors être ajoutée dans le procédé de fabrication.

Les étapes essentielles de cette fabrication sont les étapes de dépôt et de structuration. L'ordre entre ces 2 actions est fixé pour chaque bande par le choix du procédé de structuration, selon qu'il s'agit d'un procédé de type additif (structuration puis dépôt) ou soustractif (dépôt puis structuration). Généralement, le choix du procédé de structuration est dicté principalement par la taille des motifs à réaliser. En effet, les procédés soustractifs permettent de réaliser des motifs de plus petites dimensions que les procédés additifs. Selon Barrie et al. [23], dans le cas de procédés additifs, de type *lift off*, l'effet d'ombrage dû au masque lors du dépôt limiterait la taille d'élément minimale atteignable à 25 μm , alors que les procédés soustractifs, de type gravure ionique, permettraient d'obtenir des motifs de taille inférieure. Dans le cas des filtres allumettes, leurs dimensions permettent d'envisager les deux types de procédés de structuration.

De manière générale, le procédé de fabrication du composant peut se résumer à une succession d'étapes de dépôt / structuration de chaque traitement (Figure 19). Pour minimiser les réflexions et augmenter la transmission dans les bandes, toutes les interfaces doivent être traitées. Dans le cas, où le composant comporte une voie panchromatique, cette dernière peut être déposée sur une face du composant, dans d'autres cas, il peut s'agir d'un traitement de blocage commun à toutes les bandes, ou simplement d'un antireflet.

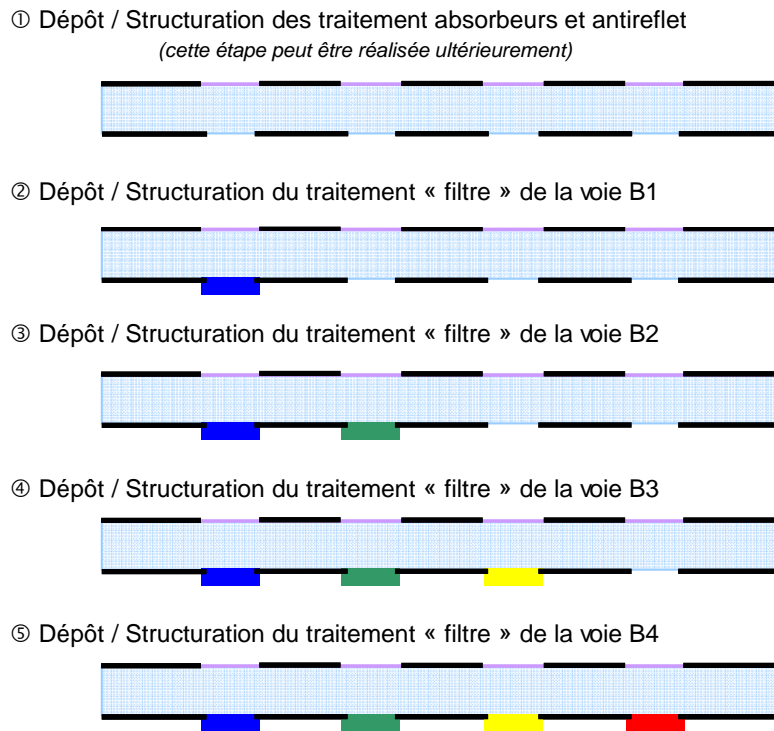


Figure 19 : Principe du procédé de fabrication (exemple d'un composant à quatre bandes spectrales).

La faisabilité d'un composant filtre allumette entièrement structuré par technologie *lift off* a notamment été validée par Angele et al. [24] au travers de la réalisation de composants prototypes 3 bandes. En effet, du fait notamment de sa maturité technologique, le *lift off* est fréquemment utilisé pour la structuration des dépôts. Il est de plus bien adapté aux empilements multicouches épais, et plus particulièrement aux empilements multidiélectriques. Il permet en outre d'obtenir une bonne précision de la définition des dimensions de bandes, par structuration du ou des traitement(s) absorbeur.

IV.2. Limites

Comme il vient d'être présenté précédemment, le procédé de fabrication actuel peut se résumer de manière générale par une mise en série des étapes de dépôt / structuration de chaque traitement, absorbeur ou filtres. Ces étapes se répètent alors en fonction du nombre de bandes spectrales constituant le composant.

Cependant, en plus des précautions particulières à prendre au fur et à mesure de la réalisation du composant avec notamment la nécessité de protéger les voies déjà déposées lors de la structuration d'une voie, chacune de ces étapes présente un risque technologique qui pèse sur l'ensemble du composant déjà réalisé. Leur succession aboutit donc à un rendement directement lié au nombre de bandes spectrales. Un calcul de probabilité effectué à partir de valeurs de probabilités arbitraires, choisies à 0,8 pour chacune des différentes étapes, conduit à un bilan d'environ 20 % pour la réalisation d'un composant à 4 bandes spectrales (Tableau 2).

Opérations	Probabilité
depot / structuration AR(ou PAN)	0,8
depot / structuration ABS face 1	0,8
depot / structuration ABS face 2	0,8
depot / structuration B1	0,8
depot / structuration B2	0,8
depot / structuration B3	0,8
depot / structuration B4	0,8
	0,21

Tableau 2 : Probabilité de réussite d'un composant.

Ce calcul ne prend en compte que les risques associés à chacune des étapes élémentaires de dépôt et structuration, incluant notamment l'alignement des motifs entre chacune des bandes. Il faudrait y ajouter les risques inhérents aux étapes, entre autres, de nettoyage, de manipulation, de découpe s'il y a lieu, voire ceux associés à la dégradation de voies déjà déposées.

Le rendement étant directement lié au nombre de bandes spectrales du composant, on peut déterminer de la même manière l'évolution du rendement de fabrication de composants avec le nombre de bandes spectrales (Figure 20). On remarque alors que la probabilité de réussite d'un composant tend rapidement vers 0 lorsque le nombre de bandes spectrales augmente.

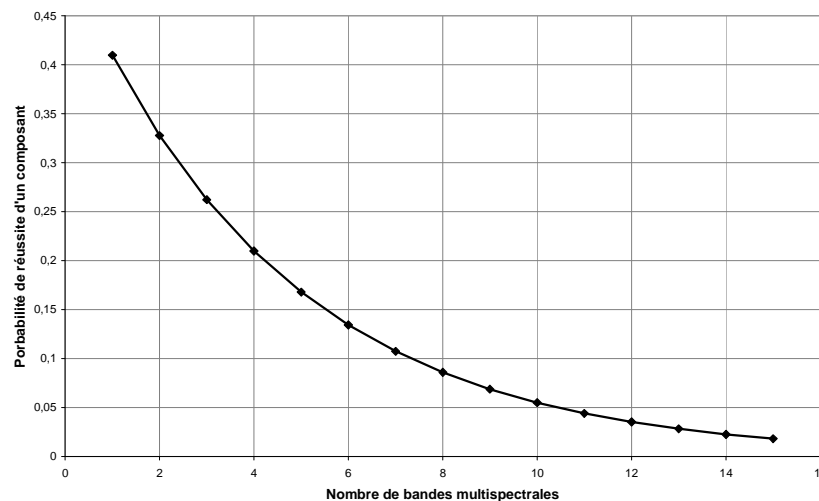


Figure 20 : Estimation du rendement de fabrication en fonction du nombre de bandes spectrales.

D'un point de vue industriel, une diminution du rendement de fabrication est synonyme d'une augmentation du coût du composant. Il existe donc avec ce procédé de fabrication une limite en terme de nombre de bandes spectrales par composant. On estime à 4, voire 5, le nombre maximal de bandes pouvant être réalisées par cette technologie. Cependant les générations futures de satellites ont des besoins estimés de l'ordre de 10 à 15 bandes spectrales. Il est donc nécessaire de développer une nouvelle technologie pour la réalisation de composants filtres allumettes.

V. Conclusion

Pour répondre à des besoins d'observation de la Terre, des images sont acquises depuis l'espace à l'aide d'imageurs embarqués sur satellite défilant. Le mode d'acquisition d'images le plus répandu est le balayage en mode *pushbroom*, c'est-à-dire que l'image est acquise ligne par ligne au cours du défilement du satellite. Les détecteurs se composent alors de barrettes linéaires et sont constituées d'autant de lignes de détection que l'on souhaite de bandes spectrales d'observation.

Dans certaines configurations d'instruments la sélection spectrale s'effectue à l'aide de filtres interférentiels placé juste devant le détecteur. Ces filtres, appelés filtres allumettes, possèdent donc des spécifications géométriques et optiques particulières, directement liées à la géométrie de l'unité de détection d'une part, et dictées par les besoins propres de la mission d'observation d'autre part. Le composant comporte donc plusieurs fonctions de filtre à bande étroite, autant que le détecteur comporte de lignes de détection, séparées par des traitements absorbants permettant de minimiser les phénomènes de lumière parasite dans le système et possédant la géométrie de la ligne de détection associée. Ces fonctions optiques de filtrage à bande étroite et d'absorbeur de lumière sont réalisées par des traitements interférentiels multicouches structurés.

Le procédé de fabrication actuel consiste à réaliser l'ensemble des voies spectrales sur un substrat unique par une mise en série des différentes étapes de fabrication. Ainsi, sur un même substrat, chacun des filtres est déposé et structuré, le risque inhérent à chaque étape de fabrication pèse donc sur le composant global. Il en découle que le rendement de fabrication est donc d'autant plus faible que le nombre de bandes spectrales est élevé, au-delà de 4 à 5 bandes spectrales ce procédé devient inadapté. Du fait du besoin croissant en termes de nombre de bandes spectrales pour les générations futures de satellites, il convient alors de mettre en place un nouveau procédé de fabrication de filtres allumettes permettant de réaliser des composants avec un nombre de bandes spectrales toujours plus important.

Chapitre II.

Assemblage de filtres

Le procédé de fabrication sur substrat unique utilisé jusqu'à présent pour la réalisation des filtres allumettes présente un risque important du fait de la mise en série de toutes les étapes de fabrication, chaque étape faisant courir son propre risque à l'ensemble du composant. Le rendement final de fabrication est alors d'autant plus faible que le nombre de bandes spectrales est élevé. Afin de pouvoir augmenter le nombre de bandes spectrales par composant, l'idée proposée est de mettre les différentes étapes de fabrication non plus en série, comme cela était le cas jusqu'à présent, mais en parallèle. Ainsi on dissocie les risques inhérents à chacune des étapes de fabrication. Pour cela, il n'est alors plus question d'envisager la réalisation des filtres sur un substrat commun, mais bien sur autant de substrats indépendants que l'on viendra assembler tous ensemble en dernière étape pour réaliser le composant final.

La réalisation d'un composant par technologie d'assemblage offre une grande flexibilité sur la structure même du composant. En effet de nombreuses architectures différentes sont alors envisageables, pour lesquelles la technologie d'assemblage ainsi que la synthèse des empilements doivent être optimisées. Le choix du procédé d'assemblage mis en œuvre pour la réalisation du composant est donc dicté d'une part directement par l'architecture choisie, et d'autre part par les contraintes liées à l'environnement spatial. Une analyse préalable de ces contraintes doit donc être effectuée afin de déterminer le procédé d'assemblage le mieux adapté. De plus, le choix de l'architecture globale du composant présente des conséquences directes sur la synthèse des empilements optiques qu'il faut alors prendre en compte, que ce soit en termes de substrats ou d'interfaces.

I. Architectures possibles

I.1. Fonction de filtrage spectral

Les substrats qui portent les différentes fonctions de filtrage optiques doivent avoir des dimensions adaptées à la géométrie des bandes. Deux démarches peuvent alors être envisagées : choisir des substrats de plus grandes dimensions et intégrer au procédé de fabrication une étape de découpe, ou bien choisir des substrats ayant directement la bonne géométrie.

I.1.1. Substrats de dimensions supérieures

Le principal avantage à choisir des substrats de plus grandes dimensions réside dans les facilités de manipulation et d'outillage qu'offrent alors ces dimensions. En effet, celles-ci peuvent être choisies de manière à s'adapter parfaitement à différents outillages existants et déjà validés. Ainsi on s'affranchit des étapes de conception, de réalisation et de validation de nouveaux outillages, que ce soit pour les étapes de nettoyage, de dépôt, ou bien encore de transport s'il y a lieu.

De plus, en réalisant le traitement sur une grande surface, il est possible de sélectionner la zone à découper de sorte que celle-ci présente des caractéristiques spectrales les plus proches des spécifications demandées ainsi que la meilleure cosmétique. Ainsi par la réalisation d'une cartographie précise des performances spectrales du composant, on peut définir la zone de substrat la mieux adaptée, mais également la direction dans laquelle effectuer la découpe afin d'avoir l'uniformité la meilleure sur toute la longueur géométrique de la bande.

Comme chacune des voies est réalisée sur un substrat indépendant, il est alors possible de déposer la fonction optique sur les deux interfaces de ce substrat sans qu'il y ait nécessairement besoin que l'un des deux empilements soit commun à plusieurs voies voisines. En effet, la configuration d'assemblage permet cette dissociation complète des fonctions optiques des différentes bandes. On peut ainsi décider de leur réalisation en plusieurs interfaces, ce qui permet de minimiser les risques inhérents aux étapes de dépôt. L'impact du nombre d'interfaces choisi sur les empilements optiques est présenté dans une partie suivante. En pratique, le nombre d'interfaces sur lequel peut être déposée la fonction optique est limitée à trois (deux substrats jointifs), voire quatre (deux substrats disjoints). Au-delà des difficultés peuvent alors apparaître, notamment pour respecter la contrainte d'épaisseur du composant final, mais également pour limiter le nombre d'opérations d'assemblage.

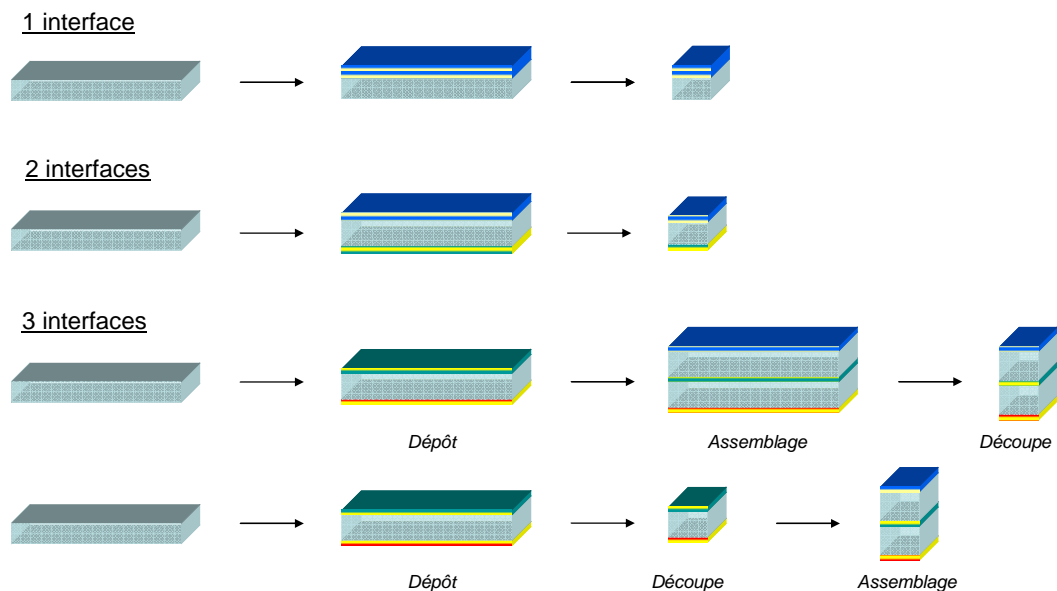


Figure 21 : Exemples de processus de réalisation de la fonction optique en partant d'un substrat de plus grandes dimensions, en utilisant une, deux ou trois interfaces.

Dans la configuration à trois interfaces, l'ordre des étapes de découpe et d'assemblage des éléments d'une même voie peut être inversé, en fonction des risques technologiques associés aux procédés utilisés pour réaliser ces opérations (Figure 21). De plus selon la manière d'assembler les différentes voies en un composant unique, l'étape d'assemblage des éléments

d'une même voie entre eux n'est pas forcément nécessaire. Ceux-ci peuvent être assemblés de manière indépendante au sein du composant final. On se rapproche alors plus d'une configuration à quatre interfaces.

Cependant l'intégration d'une étape de découpe dans le procédé de fabrication n'est pas sans risque, surtout qu'il s'agit ici de la découpe de substrats traités. Il conviendra alors d'être particulièrement vigilant lors de cette étape, afin d'éviter toute dégradation des empilements optiques, et de limiter les écailles pouvant survenir notamment au niveau des arrêtes. On pourra notamment se baser sur les procédés de découpe développés dans le cadre des filtres télécoms WDM. Ces composants, de dimensions standards de 1,4 par 1,4 mm, sont découpés avec de très bonnes précisions, de l'ordre de quelques microns pour le positionnement et d'une vingtaine de microns environ au niveau des arrêtes dans le cas de l'exemple présenté ci-dessous (Figure 22).

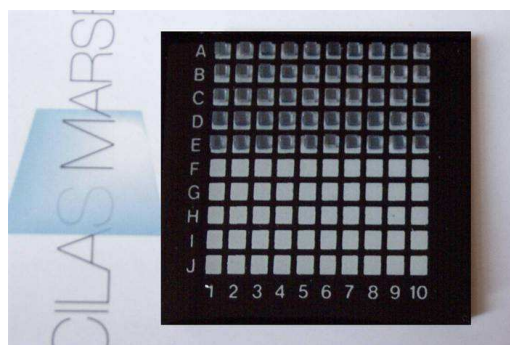


Figure 22 : Photographie de 50 filtres DWDM, découpés selon un procédé mis au point à CILAS.

De plus, les faces latérales des « allumettes » ainsi créées nécessiteront après découpe une phase de polissage ou tout au moins de doucissage afin de limiter les phénomènes de diffusion générant de la lumière parasite dans le système. Ceci se révèle être une opération délicate, sur des substrats à forte valeur ajoutée, puisque ceux-ci sont déjà traités sur une voire plusieurs faces.

1.1.2. Substrats « allumettes »

Afin de s'affranchir des risques liés à l'intégration dans le procédé des étapes de découpe et de polissage évoquées précédemment, on peut choisir des substrats possédant directement les dimensions finales. Ainsi les états de surface de chacune des faces peuvent être maîtrisés sans risque, toutes les opérations d'usinage et de polissage s'effectuant sur des substrats nus.

Les dimensions des allumettes doivent être définies en tenant compte des contraintes liées à la manipulation. Il existe toujours sur un substrat des zones non utiles pour la fonction optique mais nécessaires à la manipulation et au maintien du substrat dans ses différents outillages. Généralement le substrat est alors de dimensions légèrement supérieures à la zone utile afin d'éviter tout effet de bord. Dans notre cas, la manipulation de ces substrats de géométrie peu commune nécessite la mise en place d'outils adaptés. Des outillages de manipulation, mais également des supports de nettoyage et de traitements devront donc être conçus puis validés, spécifiquement pour la géométrie particulière des allumettes.

Il conviendra également d'être prudent au cours des étapes de réalisation des empilements optiques. En effet, du fait de la géométrie des substrats, le contrôle optique des épaisseurs déposées ne peut plus être réalisé directement sur la pièce à traiter, mais doit donc être réalisé sur un échantillon témoin, de plus grandes dimensions. Une bonne connaissance de l'uniformité de

la machine de dépôt est alors indispensable pour garantir les performances spectrales des empilements déposés sur les allumettes. Il faut être de plus vigilant au positionnement et à l'orientation des substrats dans le bâti de dépôt afin de garantir la meilleure uniformité sur toute la longueur de l'allumette.

I.2. Fonction absorbeur

La fonction absorbeur intervient essentiellement pour limiter les phénomènes de lumière parasite dans le système. Comme indiqué au chapitre précédent, on retrouve cette fonction sur les faces avant et arrière du composant final. Dans une structure assemblée comme celle considérée dans ce chapitre, cette fonction devient également nécessaire entre chaque allumette, les faces latérales des allumettes peuvent en effet être génératrices de lumière parasite.

En ce qui concerne les traitements absorbants déposés sur les faces avant et arrière du composant final, permettant à la fois de limiter les flux parasites et de définir les ouvertures propres à chaque filtre, la réalisation du composant par technologie d'assemblage offre là aussi une certaine flexibilité sur le choix de l'architecture globale. Ces traitements peuvent en effet être placés directement sur les allumettes élémentaires, sur une fenêtre commune indépendante des allumettes, ou bien encore être réalisés au moyen de masques métalliques.

I.2.1. Sur les allumettes

Les traitements absorbants peuvent être déposés directement sur les empilements réalisant la fonction optique. Cette possibilité n'est cependant envisageable que dans le cas où les substrats de départ sont de dimensions supérieures aux dimensions finales puis découpés. En effet, l'étape de structuration des dépôts absorbants apparaît particulièrement risquée sur des substrats ayant la géométrie particulière des allumettes.

Ainsi après les étapes de dépôts des empilements réalisant la fonction de filtrage, et avant l'étape de découpe sont réalisés et mis en forme les dépôts absorbants (Figure 23). Selon le procédé de structuration mis en œuvre, additif ou soustractif, l'étape de mise en forme de ces traitements s'effectue avant ou après leur étape de dépôt.

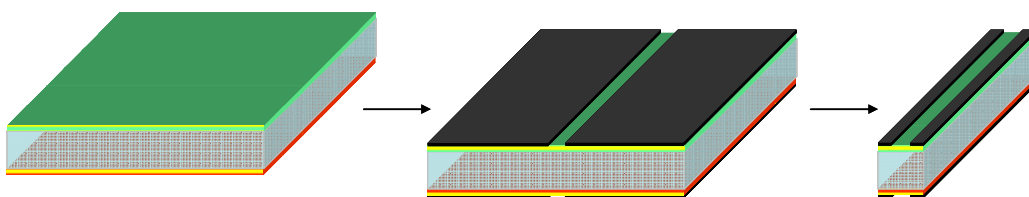


Figure 23 : Fonction absorbeur réalisée directement sur les allumettes.

Le choix de la zone à découper est donc défini lors de la structuration du traitement absorbant, il n'est alors plus possible de sélectionner la zone optimale de découpe en fonction de la cosmétique ou des performances spectrales. En effet, il n'est pas concevable de refaire le masque, mécanique ou lithographique, pour chaque substrat. De plus, une attention particulière doit être portée à l'étape de découpe qui s'effectue là encore dans les empilements optiques, sur des composants à très haute valeur ajoutée.

Une telle solution paraît adaptée dans le cas d'une architecture où les allumettes sont assemblées par la tranche (Figure 24). En effet, il convient d'être vigilant au raccordement des différents absorbants afin d'éviter le passage de lumière parasite entre les allumettes, la dégradation du traitement absorbant lors de la découpe risquant en outre d'engendrer de

mauvais raccords. Ceci met en avant la nécessité de la présence d'une fonction absorbante sur les faces latérales des allumettes. Celle-ci peut être obtenue par le dépôt d'un multicouche métal-diélectrique, par l'utilisation d'une peinture, voire par l'utilisation d'une colle noire opaque. Dans ce dernier cas, la fonction optique rejoint la fonction d'assemblage.

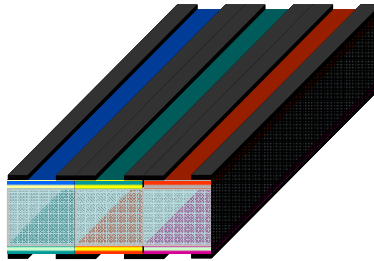


Figure 24 : Assemblage par la tranche d'allumettes portant directement la fonction absorbateur.

1.2.2. Sur une fenêtre commune indépendante

On peut choisir de réaliser l'ensemble des fonctions absorbeurs sur deux fenêtres indépendantes que l'on viendra assembler en dernière étape sur les faces avant et arrière du composant final. On s'affranchit ainsi des éventuels problèmes de raccords entre traitements absorbants. Cette possibilité est de plus envisageable que l'on se place dans la configuration où les substrats de départ sont de dimensions supérieures ou directement à la bonne géométrie.

Le positionnement de ces fenêtres doit être le plus proche possible des allumettes afin de limiter d'éventuels effets de lumière parasite. Il peut notamment être envisagé d'assembler ces fenêtres directement sur les allumettes (Figure 25). On notera que les jonctions entre les allumettes étant cette fois totalement masquées par les traitements absorbants, on peut envisager d'avoir des allumettes non jointives. Dans tous les cas, celles-ci devront cependant porter une fonction absorbante sur leurs faces latérales.

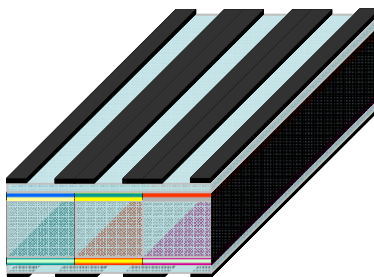


Figure 25 : Assemblage directement sur les allumettes de fenêtres portant la fonction absorbateur (les allumettes n'étant pas nécessairement jointives).

L'atout majeur de cette solution réside dans l'indépendance totale des opérations relatives aux fonctions optiques de filtrage et à celles d'absorption. L'ensemble des étapes de fabrication des allumettes et des fenêtres est réalisé en parallèle, dissociant ainsi totalement les risques de chacun des procédés.

Cependant, l'ajout de substrats supplémentaires implique de nouvelles interfaces. Ceci est intéressant pour pouvoir dissocier les différentes étapes de dépôt, mais cela augmente le risque de lumière parasite par réflexion sur ces interfaces. Il convient alors de traiter l'ensemble des interfaces : en plus des traitements absorbants, les deux fenêtres devront donc être traitées

antireflet. De plus l'ajout de ces nouveaux substrats engendre une épaisseur de verre supplémentaire dont il faudra tenir compte dans la définition du composant global. La présence de ces fenêtres se répercute donc directement sur l'épaisseur de chacun des substrats élémentaires, les spécifications en termes d'épaisseur totale étant relativement strictes.

I.2.3. Masque métallique

Les configurations d'assemblage offrent la possibilité de réaliser les fonctions absorbantes au moyen de masques métalliques. Il peut être alors envisagé de remplacer les fenêtres décrites dans le paragraphe précédant par de fines plaques de métal, percées d'ouvertures adaptées. Ces ouvertures peuvent être réalisées avec précision par les méthodes classiques de gravure des métaux.

De plus, afin de minimiser les réflexions que risquent d'engendrer de tels masques, il peut être envisagé une anodisation noire, ou même le dépôt de traitements interférentiels absorbants. En effet, la nature du substrat n'a, pour ce type de dépôt, aucune importance puisque la première couche alors déposée est une couche métallique opaque.

II. **Contraintes sur l'assemblage**

Le choix du procédé d'assemblage est déterminé en fonction de l'architecture du composant. Celle-ci impose en effet des contraintes en termes de transmission, ou bien encore de tenue mécanique. Mais il faut de plus être particulièrement attentif aux contraintes imposées par l'environnement spatial.

II.1. **Contraintes imposées par l'architecture du composant**

Selon l'architecture de composant choisie, il peut être demandé au procédé d'assemblage de répondre à certaines spécifications en termes de transmission optique.

En effet, l'assemblage peut être effectué sur le chemin optique. C'est le cas par exemple d'une configuration à trois interfaces où l'assemblage des deux allumettes portant la fonction de filtrage optique est réalisé directement sur les traitements interférentiels. Dans ce cas, le joint d'assemblage doit donc être parfaitement transparent sur tout le domaine spectral d'intérêt. Pour notre application, on rappelle qu'il s'agit des domaines visible et proche infrarouge, typiquement entre 300 et 1100 nm d'une part, 1100 et 2500 nm d'autre part. L'assemblage est de plus réalisé sur des surfaces traitées. La technologie choisie devra donc être compatible avec ce type de surfaces et permettre l'assemblage sans dégradation des fonctions optiques. Enfin, l'épaisseur du joint d'assemblage doit pouvoir être maîtrisée avec une bonne précision, afin de garantir l'épaisseur optique traversée pour chaque voie.

Il peut être également intéressant dans certaines architectures de composants d'utiliser un procédé d'assemblage noir opaque. Celui-ci peut alors participer à la fonction absorbeur du composant en limitant une partie de lumière parasite. Par exemple, dans le cas d'allumettes assemblées par les faces latérales, l'utilisation d'un procédé d'assemblage opaque contribue à limiter le phénomène de diaphonie entre les voies.

En résumé, selon les faces par lesquelles on choisit d'assembler les allumettes, on considérera trois types d'assemblage : l'assemblage structural, lorsqu'il s'agit des extrémités des allumettes, l'assemblage optique transparent, lorsque celui est réalisé sur les faces traitées, et l'assemblage optique opaque, lorsque les allumettes sont assemblées entre elles par les faces latérales (Figure 26).

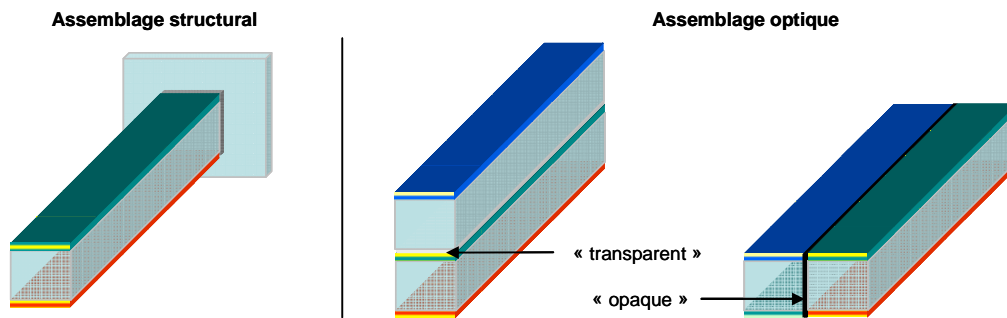


Figure 26 : Types d'assemblage selon les faces utilisées pour l'assemblage des allumettes.

Des contraintes en termes de tenue mécanique peuvent également apparaître en fonction de l'architecture du composant choisi, et surtout de l'ordre des étapes de fabrication. En effet, il peut être envisagé d'intégrer des étapes d'usinage après assemblage. Dans certaines configurations, il est par exemple nécessaire de réaliser une étape de découpe et/ou de polissage sur des éléments assemblés. C'est notamment le cas dans une configuration à trois interfaces lorsque les substrats initiaux sont de dimensions supérieures aux dimensions finales et assemblés avant d'être découpés.

De plus, la procédure d'assemblage des différents éléments dicte également certaines spécifications auxquelles doit répondre la technologie d'assemblage. En effet, l'alignement des éléments les uns par rapport aux autres est un paramètre critique, et il convient de définir une procédure permettant de réaliser cet alignement avec précision au cours des étapes d'assemblage. Il peut être envisagé de réaliser un pré-positionnement des éléments avant l'assemblage, ou d'assembler directement les éléments dans leur position définitive. Ces considérations doivent être prises en compte au moment du choix de la technologie d'assemblage.

II.2. Contraintes imposées par l'environnement spatial

Le composant que l'on désire réaliser doit pouvoir être utilisé en environnement spatial et doit donc supporter les différentes contraintes liées à ce type d'applications. De ce fait, la, ou les, technologies d'assemblage mises en œuvre pour sa fabrication doivent répondre à certaines spécifications.

Tout d'abord, avant le lancement les composants sont stockés pendant une durée plus ou moins longue dans des conditions climatiques équatoriales. Ils doivent donc pouvoir supporter la chaleur humide, typiquement une température de l'ordre de 40°C avec une humidité ambiante supérieure à 90 %. Puis le lancement du satellite impose des contraintes sur la tenue mécanique de l'assemblage. Celles-ci se traduisent principalement par des spécifications sévères en termes de tenue aux chocs et aux vibrations. Typiquement les fréquences pour lesquelles sont définies les niveaux de chocs et de vibrations se situent entre une dizaine de Hz jusqu'à plusieurs kHz. Les niveaux de chocs sont de l'ordre de quelques dizaines à plusieurs centaines de g, les vibrations quant à elles dépendent du type, sinusoïdal ou aléatoire, et sont généralement identiques suivant les trois axes du composant.

Une fois le satellite placé en orbite, le composant doit supporter les conditions sévères de l'environnement spatial. Il s'agit notamment de supporter des gammes de température pouvant aller typiquement de -100°C jusqu'à +60°C. Cet environnement implique également une compatibilité du procédé d'assemblage avec les applications sous vide. En effet, il convient

d'être particulièrement attentif aux éventuels dégazages qui peuvent survenir et dégrader les performances de l'instrument par contamination du détecteur ou des optiques. Le dégazage d'un matériau se quantifie par deux critères principaux : sa perte de masse totale ou TML (Total Mass Loss) déterminée par mesures de son poids avant et après le test de mise sous vide, et son taux de matière volatile condensable ou CVCM (Collected Volatile Condensable Material) déterminée de la même manière par la mesure de différence de masse d'un collecteur dédié. Selon les spécifications de la NASA, pour pouvoir être utilisé dans le domaine spatial, un matériau doit présenter une valeur de TML inférieure à 1 %, et une valeur de CVCM inférieure à 0,1 %. Il existe des bases de données regroupant les valeurs de TML et de CVCM de différents matériaux déterminés suivant la procédure E595-77/84/90 (« Total Mass Loss and Collected Volatile Condensable Materials from Outgassing In Vacuum Environment ») de la NASA.

De plus le domaine spatial étant un domaine stratégique, il conviendra alors d'apporter une attention particulière à l'origine des différentes technologies et matériaux utilisés au sein du composant, notamment en ce qui concerne le procédé d'assemblage. Il faudra par exemple s'assurer que celui-ci n'est soumis à aucune restriction d'exportation suivant notamment la norme ITAR (International Traffic in Arms Regulations) du nom de la législation américaine au titre de laquelle les Etats-Unis doivent donner leur accord pour l'exportation des équipements comportant une technologie sensible, cette législation pouvant s'appliquer à des procédés, voire des adhésifs.

D'autres contraintes directement liées à l'environnement spatial s'appliquent, telle que la tenue aux radiations, de type gamma ou proton, mais elles concernent davantage les substrats, et non pas directement le procédé d'assemblage.

III. Technologies d'assemblage

Il convient donc en fonction des contraintes qui viennent d'être mises en avant d'identifier les technologies d'assemblage nous paraissant les plus adaptées. Cet assemblage pouvant être simplement structural, ou bien encore optique.

III.1. Collage

Parmi les méthodes les plus utilisées pour l'assemblage de pièces optiques se trouvent les technologies à base d'adhésifs. Industriel grâce à son faible coût et son rendement élevé, ce procédé fiable permet d'obtenir un lien sûr entre des matériaux similaires ou différents. La large gamme d'adhésifs se trouvant aujourd'hui sur le marché permet d'ajuster le procédé en fonction des besoins spécifiques de chaque application.

III.1.1. Collage structural

Les colles les plus utilisées aujourd'hui dans l'industrie spatiale sont des colles de type époxy et silicone. De manière très générale, et concernant les spécifications propres aux filtres allumettes, on retiendra des colles époxy entre autres une bonne adhérence sur de très nombreux supports différents mais une certaine fragilité à froid. A l'inverse, les colles silicones présentent de bonnes caractéristiques sur de larges gammes de température, mais une mise en œuvre plus délicate. On notera également une viscosité généralement plus importante des colles silicones par rapport aux colles époxy, paramètre important si les éléments sont positionnés et que l'on désire faire migrer l'adhésif à l'interface.

Les propriétés des colles sont en outre dépendantes des paramètres de réticulation, notamment en ce qui concerne la gamme de température supportée. Cette dernière peut

s'effectuer, selon la nature chimique de la colle par différents moyens, les plus fréquents étant la réticulation par traitement thermique ou bien encore l'exposition au rayonnement UV. Sur ce point également, il conviendra selon l'architecture du composant de s'assurer de pouvoir faire polymériser la colle dans les meilleures conditions, et notamment dans le cas d'une réticulation par exposition au rayonnement UV de valider que le joint de colle est bien accessible à ce type de rayonnements. Une attention particulière devra également être portée sur le retrait de l'adhésif au moment de la polymérisation. Ceci devra être pris en compte lors de la mise en place de la procédure de collage, afin d'éviter notamment tout risque de désalignement des éléments.

Une recherche de colles structurales a été effectuée et parmi la large gamme d'adhésifs présente sur le marché, certaines d'entre elles ont été identifiées comme adaptées aux contraintes spécifiques des filtres allumettes. Par exemple, l'adhésif CV16-2500 proposé par NUSIL nous semble convenir pour un collage structural dans une configuration où les éléments sont pré-positionnés, demandant en l'occurrence une faible viscosité. Il s'agit d'un adhésif silicone bi-composant réticulant par traitement thermique et présentant une viscosité de seulement 3500mPa.s ce qui est particulièrement difficile à trouver pour un adhésif de type silicone. En outre il peut supporter sans dégradation une gamme de température s'étendant de -115°C à +260°C, et présente un dégazage faible avec une valeur de TML de 0,04 % et une valeur de CVCM inférieur à 0,01 %. De plus, il a été vérifié que cet adhésif n'est pas concerné par la réglementation ITAR.

III.1.2. Collage optique transparent

Comme il a été vu précédemment, il peut être envisagé de réaliser l'assemblage des substrats sur le chemin optique. On recherche alors des colles avec des propriétés spécifiques au niveau de leur transmission.

Là encore, une recherche a été effectuée afin d'identifier des colles adaptées à nos besoins. Parmi elles, a été retenu l'adhésif NOA81 (Norland Optical Adhesive) de type époxy mono-composant proposé par Norland. La réticulation se fait par exposition au rayonnement UV. L'avantage particulier de cet adhésif réside dans sa transmission élevée sur tout le domaine spectral VNIR. On note toutefois une décroissance au-delà de 2 μ m (Figure 27). Son indice de réfraction, auquel il convient de porter une attention particulière puisque dans une telle configuration l'adhésif tient lieu de milieu extérieur pour les empilements optiques, est compris entre 1,58 et 1,54 dans le domaine spectral VNIR ce qui est relativement proche de l'indice du verre.

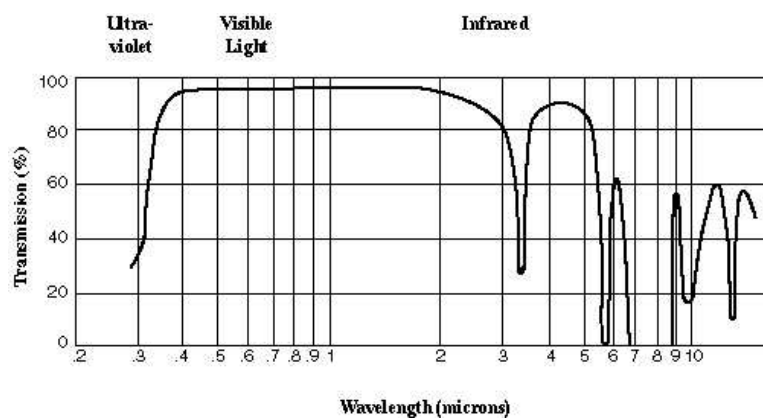


Figure 27 : Transmission de l'adhésif NOA81, épaisseur de 25,4 μ m (©Norland).

Cet adhésif supporte des températures allant de -150°C à $+125^{\circ}\text{C}$. Cette gamme est particulièrement étendue pour une colle époxy, en particulier au niveau des basses températures. Son comportement sous vide a été testé par la NASA³ et les résultats sont conformes avec les spécifications requises, soit une valeur de TML de 0,93 % et de CVCM de 0,03 %. En outre il n'est pas soumis aux restrictions d'exportation suivant la norme ITAR.

III.1.3. Collage optique noir

Dans le cas où l'on souhaite coller les allumettes entre elles par la tranche, il peut être envisagé d'utiliser une colle structurale, mais il est plus intéressant d'utiliser alors une colle opaque noire dont les propriétés optiques permettraient de limiter les flux parasites.

Le nombre de colles répondant à ce critère est beaucoup plus restreint que celui des colles transparentes. Cependant il a été identifié l'adhésif EPO-TEK 320 proposé par Epoxy Technology. Cet adhésif époxy bi-composant qui polymérise par traitement thermique présente une transmission inférieure à 1 %, pour une épaisseur de $25,4\ \mu\text{m}$ sur le domaine spectral de 300 à 2500 nm, soit sur toute notre gamme spectrale d'intérêt. Cependant cet adhésif est fragile à basse température puisque sa gamme d'usage spécifié va de -55°C à $+200^{\circ}\text{C}$. Une adaptation des paramètres de réticulation, et plus particulièrement une diminution de la température de polymérisation, pourrait permettre d'élargir cette gamme de température. Concernant le dégazage, les tests effectués par la NASA sur cet adhésif révèlent une valeur de CVCM de 0,02 % mais de TML de 1,49 % ce qui est légèrement supérieure aux spécifications requises. Cependant ces données sont à prendre avec précaution puisqu'il nous a été signalé par le fabricant une erreur de dosage des composants de la part de la NASA pour ces tests de dégazage.

III.2. **Adhérence moléculaire**

Utilisée depuis longtemps pour l'assemblage de composants optiques, l'adhérence moléculaire permet d'obtenir, à température ambiante, un lien précis et optiquement transparent, sans aucun adhésif, ni quelconque matière extérieure. La physique de l'adhérence moléculaire est encore mal connue étant donné la complexité des phénomènes entrant en jeu, ce domaine reste avant tout un savoir-faire empirique.

III.2.1. Principe

L'adhérence moléculaire est une technologie basée sur les forces d'attraction moléculaires de type Van der Waals. Ces forces attractives sont d'autant plus importantes que la distance entre les deux surfaces est faible. En outre, elles dépendent de la nature des surfaces, selon qu'elles sont hydrophiles ou hydrophobes.

La différence principale existant entre ces surfaces est la présence sur les surfaces hydrophiles d'un film d'eau correspondant à quelques monocouches moléculaires. Dans ce cas, des interactions par liaisons hydrogène peuvent être mises en jeu, dès lors que les surfaces sont constituées d'atomes présentant une grande affinité pour les électrons liés à des atomes d'hydrogène. Dans le cas des surfaces hydrophobes, il n'y a pas de molécules d'eau adsorbées, et l'adhérence est réalisée par des liaisons de Van Der Waals, d'énergie plus faible que la liaison hydrogène. Ce cas a été particulièrement étudié puisqu'il correspond notamment au cas du silicium, dont l'assemblage est un enjeu important dans des applications de type optoélectronique [25], les verres optiques quant à eux étant plutôt de nature hydrophile.

³ <http://outgassing.nasa.gov/>

Afin d'initier le lien, les surfaces à assembler doivent être suffisamment proches l'une de l'autre pour que puissent intervenir les forces d'attraction moléculaire, ce qui signifie qu'elles doivent posséder certaines spécificités. En effet pour réussir à rapprocher suffisamment les 2 surfaces, ces dernières doivent présenter une très bonne qualité de surface, en termes notamment de planéité et de rugosité. Idéalement, la déviation entre les 2 éléments doit être d'environ $\lambda/10$ avec une rugosité de 1 nm rms [26], sachant que plus l'état de surface sera bon, meilleur sera le lien et la qualité de l'interface. D'un point de vue chimique, les surfaces doivent être exemptes de toute contamination organique ou particulaire, sachant qu'il a été montré qu'une particule de seulement 0,5 μm localisée à l'interface peut induire un défaut d'assemblage sur un diamètre pouvant atteindre 2,5 mm [27]. Un nettoyage des surfaces est donc nécessaire avant toute opération d'assemblage, en portant une vigilance particulière aux hydrocarbures et dépôts de nature organique. Après préparation des surfaces, celles-ci sont mises en contact. On observe alors des interférences de coin d'air, dont les franges colorées disparaissent au fur et à mesure de la progression de l'adhésion, jusqu'à ce que l'interface devienne invisible. Le positionnement des deux éléments l'un par rapport à l'autre doit être réalisé avant que ne débute le processus d'adhérence, il n'est en effet pas possible d'ajuster l'alignement des pièces dès que celles-ci ont commencé à adhérer. Pour pallier ce problème, une variante consiste à placer à l'interface une petite quantité d'alcool, permettant ainsi d'ajuster le positionnement des pièces, durant le temps que l'alcool s'évapore, en les faisant glisser l'une par rapport à l'autre sans perdre le contact [28].

Le lien ainsi créé est de très bonne qualité optique : la diffusion ainsi que les pertes par absorption à l'interface sont tout à fait négligeables. De plus, comme il ne s'agit pas d'un lien « chimique », les composants adhérents sont résistants aux solvants tout comme aux pH extrêmes, et ne présentent pas de dégazage. Ce procédé d'assemblage est qualifié pour les applications spatiales. Citons parmi elles le lidar ALADIN (Atmospheric LAsEr Doppler INstrument) dont les étalons Fabry-Perot ont été assemblés par cette technologie [29].

On notera que le lien d'adhérence moléculaire est d'autant plus fort que les caractéristiques des matériaux (nature chimique, coefficient de dilatation...) sont proches, le cas d'adhérence entre des matériaux similaires constituant habituellement l'idéal. Pour faciliter l'assemblage, il peut être alors intéressant dans certains cas de déposer une couche d'un même matériau sur les 2 surfaces à adhérer [30]. Si les matériaux sont différents, les contraintes subies par l'assemblage peuvent engendrer une rupture du lien, notamment en cas de coefficients d'expansion thermique différents. En effet, le lien d'adhérence est fragile face à un gradient thermique le contraignant à se dilater de manière anisotrope. Il peut s'agir d'une sollicitation thermique de l'ensemble dans le cas de matériaux différents, ou dans le cas de matériaux identiques d'un choc thermique n'affectant qu'une seule des pièces.

On notera qu'il est possible de renforcer l'adhérence par un recuit à haute température. L'énergie thermique apportée à l'interface favorise la diffusion de certaines espèces, pouvant provoquer la formation de liaisons covalentes entre les 2 matériaux. On parle alors de soudage par diffusion [26].

III.2.2. Tests

Il s'agit d'identifier l'impact de différents types de sollicitations sur la tenue du lien d'adhérence moléculaire, au travers de tests sur des assemblages entre des allumettes et des substrats de différentes natures, recouverts ou non de traitements interférentiels multicouches. L'assemblage par adhérence moléculaire de substrats traités ayant été étudié au laboratoire dans le cadre de la thèse de J. Floriot [31], les tests n'ont pas été approfondis dans cette voie, mais orientés pour valider la résistance du lien au dépôt de couches minces optiques. En effet, dans le cas, par exemple, d'une configuration à trois interfaces, le dépôt des fonctions

absorbants sur les faces latérales des allumettes peut intervenir après l'étape d'assemblage des allumettes entre elles.

- Tests préliminaires sur substrats de silice

Dans cette première série de tests, on souhaite mettre en avant les sollicitations face auxquelles le lien d'adhérence se révèle être le plus fragile. Le choix de ces tests a été défini de sorte à identifier les étapes critiques si l'on désire réaliser un dépôt de couches minces sur un assemblage. Au cours d'un dépôt de type DIBS, le substrat est soumis à une mise sous vide de l'ordre de quelques 10^{-6} mbar ainsi qu'à une température allant jusqu'à 70°C environ. Il faut également prendre en compte l'étape de nettoyage préalable au dépôt, qui peut être réalisée en chaîne automatisée par immersion successive dans des bains lessiviels et des solvants.

Pour réaliser ces tests préliminaires, plusieurs allumettes de nature différente ont été adhérentes sur trois substrats de silice de diamètre 35 mm (Figure 28). Sur chacun de ces substrats a été adhérente :

- une allumette de silice
- une allumette de verre coloré non traitée (RG695 ou RG610)
- une allumette de verre coloré RG715 traité

On notera que les allumettes traitées présentent un défaut de planéité, probablement dû au traitement, rendant leur adhérence particulièrement difficile, notamment aux extrémités. Les coefficients de dilatation thermique des matériaux mis en jeu lors de ces tests sont de l'ordre de $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour la silice et $9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour les verres colorés.



Figure 28 : Allumettes adhérentes sur substrats de silice.

Ces trois composants ont ensuite été soumis aux tests suivants :

- montée en température à 130°C avec des rampes de 2°C/min en montée, 1°C/min en descente et un palier de 12h,
- mise sous vide, à $6 \cdot 10^{-6}$ mbar, pendant 2h30,
- cyclage thermique de 8 cycles entre -50°C et 70°C avec des rampes de 4°C/min et des paliers de 3h.

Les liens d'adhérence ont été observés avant et après chaque test. C'est par ce contrôle visuel que l'on valide ou non si le lien a passé le test avec succès. On estime que lorsqu'il n'apparaît pas de franges à l'issue du test, le lien n'a pas été modifié (✓), à l'inverse si des franges apparaissent mais que le composant est toujours adhérent sur une surface suffisante, on considère le lien affaibli (↘), et dans le cas où des franges sont visibles sur l'ensemble de la surface, on juge le lien rompu (✗).

Les résultats de ces tests sur substrats de silice sont résumés dans le Tableau 3.

		TESTS sur substrats de silice (x3)		
		Montée en température	Vide	Cyclage thermique
Allumettes	Silice	✓	✓	✓
	RG695	✓	✓	↘
	RG610	1/2	✓	✓
	RG715 traité	×	✓	2/3 ↘

Tableau 3 : Résultats des tests d'adhérence sur substrats de silice.

On constate tout d'abord qu'aucun des liens d'adhérence moléculaire n'a pas été dégradé par le test de mise sous vide. En revanche, la montée en température ainsi que le cyclage thermique ont conduit à l'affaiblissement, voire à la rupture, de certains liens d'adhérence. Cependant, il est à noter que les substrats utilisés ici ne présentaient pas un état de surface spécifiquement optimisé pour l'adhérence moléculaire, et que la découpe des allumettes a engendré des égrenures qui ont détérioré la qualité des surfaces. Les liens étaient de ce fait initialement fragiles, et leur dégradation à l'issue de ces tests peut être imputable à ces défauts.

Nous avons également réalisé des tests d'immersion. Le lien d'adhérence étant chimiquement inerte, il n'est pas nécessaire d'effectuer des tests dans des solvants ou lessives différents. Pour cela deux allumettes de silice ont été adhérees sur un substrat de silice. Ce composant a été soumis à une succession d'immersion de quelques heures dans de l'eau désionisée à température ambiante alternée par des montées en température. Puis, il a été immergé dans de l'eau chaude, à environ 70°C, pendant plusieurs heures (Figure 29).



Figure 29 : Immersion dans de l'eau désionisée d'allumettes de silice adhérees sur un substrat de silice.

Un contrôle visuel entre chacune de ces étapes a été effectué et n'a montré aucune dégradation du lien d'adhérence.

- Tests de dépôt sur substrats de BK7G18

Nous avons cherché à valider la tenue du lien d'adhérence moléculaire au dépôt de couches minces optiques. Les tests préliminaires réalisés sur substrats de silice ont montré que le lien résiste à l'immersion, et au passage sous vide, mais peut présenter une certaine fragilité face aux contraintes thermiques. Il conviendra alors avant toute chose de réaliser un nouveau test de montée en température afin de s'assurer de la qualité des adhérences. Si les résultats de ce test sont positifs, les composants seront nettoyés en chaîne automatisée, puis traités.

Pour cela, plusieurs allumettes de nature différente ont été adhérees sur deux substrats de BK7G18 de diamètre 48mm. Les allumettes sont constituées de matériaux choisis parmi ceux qui sont susceptibles d'être utilisés en tant que substrats dans nos domaines spectraux d'intérêt, à savoir de la silice et des verres colorés pour le domaine VNIR, ainsi que du silicium pour le domaine SWIR. Sur chacun des deux substrats sont adhérees (Figure 30) :

- une allumette de silice,
- trois allumettes de verre coloré (RG610, RG665 et RG695),
- une allumette de silicium.

On rappelle que les coefficients de dilatation thermique de la silice et des verres colorés sont respectivement de l'ordre de $0,5$ et $9.10^{-6} K^{-1}$. Ces coefficients s'élèvent à $7,5.10^{-6} K^{-1}$ pour le BK7, et $2,6.10^{-6} K^{-1}$ pour le silicium.

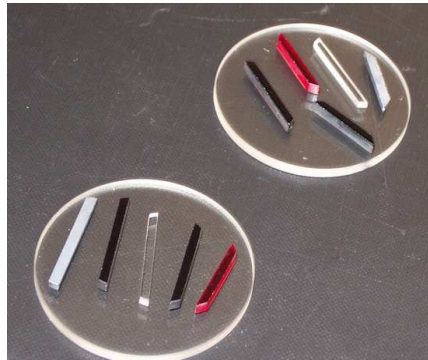


Figure 30 : Allumettes adhérees sur substrats de BK7G18.

Ces deux composants ont tout d'abord été soumis à une montée en température, selon le même cycle que dans le cas des substrats de silice. Puis, ils ont été nettoyés en chaîne automatique selon un cycle adapté à partir du cycle de nettoyage standard du BK7. Ils ont au cours de ce nettoyage été immergés dans plusieurs lessives avec des ultrasons, rincés dans de l'eau puis de l'eau désionisée, puis séchés à $60^{\circ}C$. Ils ont ensuite été traités : une monocouche de SiO_2 a été déposée par technologie DIBS sur les assemblages. Les résultats de ces tests sont présentés dans le Tableau 4.

		TESTS sur substrats BK7G18 (x2)		
		Montée en température	Nettoyage en chaîne	Traitement DIBS
Allumettes	Silice	✓	✓	✓
	RG610	✓	✓	✓
	RG665	↗	1/2	✓
	RG695	✓	1/2	✓
	Silicium	→	1/2	↘

Tableau 4 : Résultats des tests sur substrats de BK7G18

On constate que parmi les tests effectués ici le nettoyage en chaîne apparaît comme étant le plus critique. Cependant, vu la diversité des matériaux constituant les assemblages, les lessives dans lesquelles ont été immergés les composants pouvaient être agressives pour certains d'entre eux. On ne peut pas discriminer la cause de l'affaiblissement ou de la rupture des liens d'adhérence entre l'attaque chimique ou l'immersion ou bien encore les ultrasons. Le dépôt sur ces composants d'une monocouche de SiO_2 en technologie DIBS n'a quant à elle eu que peu d'impact sur la tenue des adhérences.

Afin de compléter notre série de tests, certaines allumettes ont été volontairement désadhérées par choc thermique après dépôt pour être ensuite à nouveau adhérees face traitée sur un substrat de BK7G18 traité lui aussi avec une monocouche de SiO_2 en technologie DIBS. Une allumette de silicium non traitée a également été adhéree (Figure 31).

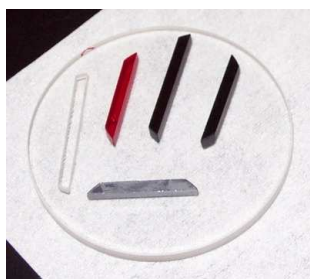


Figure 31 : Allumettes traitées adhérees sur un substrat de BK7G18 traité.

Le composant ainsi constitué a ensuite été collé par la tranche dans un barillet puis soumis à des tests de vibrations pendant 60s selon les paramètres présentés dans le Tableau 5. A l'issue de ce test, aucun lien d'adhérence n'a été rompu, ni même affaibli. On notera cependant que cette résistance aux vibrations était attendue, compte tenu de la faible masse des substrats et par conséquent des efforts relativement faibles auxquels ils sont soumis.

Sinus :	10 Hz – 26 Hz	Déplacement maximal
	26 Hz – 100 Hz	20g
Random :	10 Hz – 60 Hz	+9dB/oct
	60 Hz – 400 Hz	0,5 g ² /Hz
	400 Hz – 2000 Hz	18,4 gRMS

Tableau 5 : Paramètres du test de vibrations.

En résumé, l'ensemble de ces tests nous a permis de valider notre capacité à adhérer une grande diversité de matériaux. Ainsi, par ces résultats, les liens d'adhérence moléculaire apparaissent comme plus fragiles face aux sollicitations d'ordre thermique, la mise sous vide et le dépôt n'ayant quant à eux pas eu d'impact sur les différents assemblages. Le nettoyage en chaîne automatisée a cependant montré la faiblesse de certains liens, soit due aux ultrasons, ou aux attaques chimiques des lessives, soit à l'immersion : il suffit d'une petite zone non adhéree pour que le solvant s'infilte et migre.

Toutefois ces résultats nous permettent d'envisager le dépôt en technologie DIBS sur des substrats adhéres, ainsi que l'adhérence sur des substrats traités, validée par le test en vibrations.

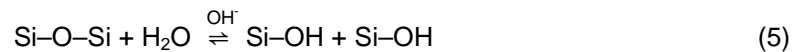
III.3. Assemblage catalysé par hydroxyde

Ce procédé d'assemblage est basé sur le processus chimique d'hydratation / déshydratation catalysé par hydroxyde, et permet d'assembler deux surfaces à température ambiante par un lien optiquement transparent. Il a été développé et breveté par D.H. Gwo [32]-[33] à l'université de Stanford afin d'assembler des composants de silice dans le cadre de la mission Gravity Probe B de la NASA lancé en 2004. Cette technique a ensuite été transférée et développée à l'université de Glasgow, pour être utilisée dans des systèmes de détection d'ondes gravitationnelles, tel que l'interféromètre GEO600.

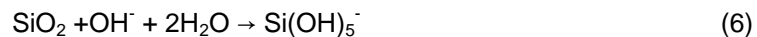
III.3.1. Principe

La chimie de ce procédé peut se décomposer en trois étapes principales : l'hydratation, la gravure, et la polymérisation et déshydratation [34]-[36]. Le principe de cette technologie est illustré ici au travers de l'exemple d'un assemblage entre 2 surfaces de silice.

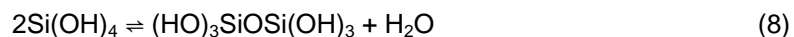
Tout d'abord, intervient une réaction d'hydratation, qui ne peut se produire à température ambiante que si elle est catalysée par des ions hydroxydes :



Ensuite intervient une étape de gravure de la silice par les ions hydroxydes :



Cette dernière conduit à une diminution de la concentration en ions OH^- , donc une diminution du pH de la solution. Lorsque le pH devient inférieur à 11, les ions silicates se dissocient pour former des molécules Si(OH)_4 , qui peuvent se combiner et polymériser pour former des chaînes siloxanes (-Si-O-Si-) et de l'eau :



Au fur et à mesure que l'eau s'évapore ou migre dans le volume, les chaînes siloxanes fournissent une rigidité à l'interface, formant ainsi le lien.

Cette technologie d'assemblage requiert donc l'insertion d'une solution alcaline entre les surfaces à assembler. Selon différents facteurs, comme la nature des matériaux, le décalage d'état de surface et l'application recherchée, la solution d'assemblage inclut différents éléments : elle est composée d'ions hydroxydes en solution aqueuse, les plus adaptés étant les sels ioniques de type NaOH, KOH, NH_4OH ... mais elle peut également inclure un composé de silicate et/ou des composants modifiant certaines caractéristiques du joint, tel la conductivité thermique ou électrique, l'absorption, la transmission optique,...[32]-[33].

Comme dans le cas de l'adhérence moléculaire, les surfaces à assembler doivent répondre à des exigences strictes en termes d'état de surface, et notamment de contamination chimique, de rugosité, mais surtout de planéité. Typiquement il est demandé une planéité d'environ $\lambda/10$ pour une rugosité de quelques angströms [36].

Tout d'abord, les surfaces sont nettoyées, ce qui peut permettre d'augmenter leur caractère hydrophile intrinsèque, et de minimiser la contamination particulaire. En général le nettoyage chimique des surfaces est moins critique que celui exigé par l'adhérence moléculaire. Ensuite, la solution contenant les ions hydroxydes est appliquée sur au moins une des surfaces, et celles-ci sont placées suffisamment proches l'une de l'autre pour créer un lien chimique. En fonction de l'application, le système assemblé peut être chauffé et/ou placé dans un environnement basse pression afin de maximiser la surface d'assemblage. Le procédé peut être réalisé à température ambiante avec un bon rendement, qui peut être maximisé en réalisant l'opération d'assemblage en salle blanche, en classe 100. Le choix de l'hydroxyde détermine les propriétés mécaniques du lien [35], le temps de mise en œuvre dépend quant à lui de la composition et du pH de la solution. Il peut être ajusté pour permettre l'alignement des éléments à assembler [34].

Le lien ainsi créé est robuste en environnement humide. Il est chimiquement inerte. L'épaisseur du joint à l'interface peut être inférieure à une centaine de nanomètres [36]. Il est généralement insensible aux UV et transparent dans les domaines du visible et proche infrarouge, au minimum. Il peut supporter une large gamme de température allant d'environ -270°C à 150°C [32]. De plus, il ne présente que peu voire pas de dégazage et peut être utilisé pour des applications en ultravide. En passant avec succès le programme de qualification rigoureux défini pour la mission Gravity Probe B de la NASA, sa compatibilité pour les applications spatiales a ainsi été validée, notamment par rapport aux contraintes liées au lancement.

III.3.2. Tests

Ces tests ont été réalisés à l'IGR (Institute for Gravitational Research) de l'Université de Glasgow.

Il s'agit alors d'assembler par la méthode décrite précédemment des substrats de géométrie allumette sur des substrats circulaires de diamètre 25mm (Figure 32). L'ensemble de ces substrats est en silice et poli pour adhérence.

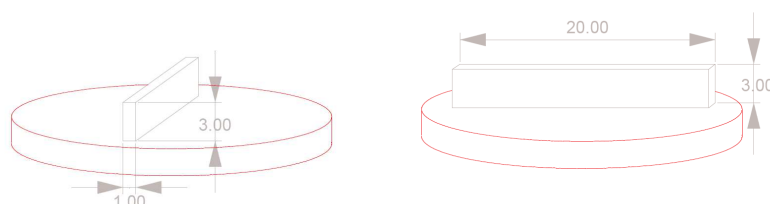


Figure 32 : Géométrie des assemblages réalisés par hydratation / déshydratation catalysée par hydroxyde.

Dans un premier temps, trois assemblages entre des substrats nus ont été réalisés, afin de valider l'adéquation de cette méthode d'assemblage avec la géométrie particulière des allumettes. Ces assemblages sont présentés sur la Figure 33.

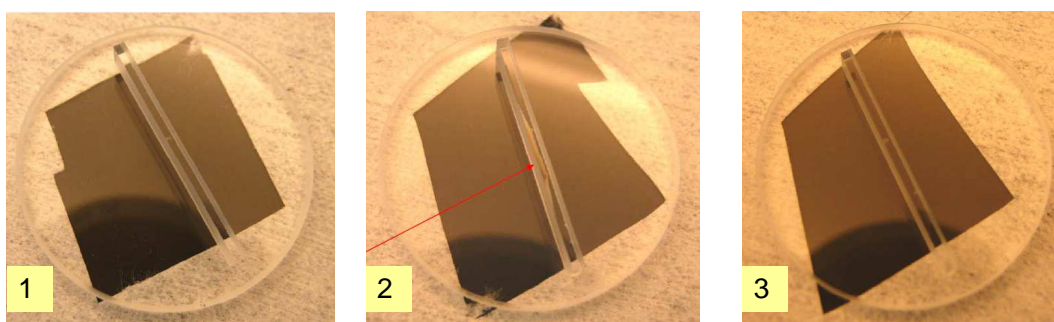


Figure 33 : Photographies des assemblages entre substrats nus de silice réalisés par hydratation / déshydratation catalysée par hydroxyde.

La solution utilisée pour réaliser ces assemblages est basée sur des ions sodium. On constate par observation visuelle de bons résultats pour deux des trois assemblages (assemblages 1 et 3), le composant 2 ayant quant à lui une zone importante non assemblée du fait d'un mauvais état de surface de l'allumette. En effet, la présence d'un défaut sur une des surfaces engendre un défaut d'assemblage sur une zone autour du défaut, comme le montre l'exemple de la Figure 34 .



Figure 34 : Image au microscope optique d'un défaut d'assemblage.

Ces premiers résultats nous laissent confiants quant à l'utilisation de ce procédé pour notre application. Des tests complémentaires devront toutefois être réalisés afin de s'assurer que cette technologie d'assemblage est bien adaptée à nos besoins.

III.4. Autres technologies envisagées

III.4.1. Low Temperature Bonding (LTB)

Ce procédé d'assemblage, développé par Schott Glass Technologies, permet de créer, à relativement basse température ($< 120^{\circ}\text{C}$), un lien chimique entre deux éléments par l'intermédiaire d'une solution aqueuse inorganique [37]-[40].

Les qualités de surface nécessaires pour cette technologie d'assemblage sont moins strictes que dans le cas de l'adhérence moléculaire. En effet, il est demandé une planéité d'environ $\lambda/3$ pour les applications optiques. La réalisation se déroule à température ambiante, dans une salle blanche en classe 100. Tout d'abord, les composants sont préparés pour l'assemblage : les faces à assembler sont nettoyées afin de retirer toute contamination de surface puis activées chimiquement dans un état hydrophile. Après cette activation chimique, le lien est initié par l'application d'un petit volume de solution entre les deux surfaces. Les composants sont mis en contact et l'alignement est réalisé dans les premières minutes. La solution d'assemblage réagit avec les surfaces des substrats pour former un lien qui sera mécaniquement stable après environ une semaine, selon la géométrie du système. Pour enlever le stress résiduel, les composants peuvent être cyclés thermiquement (-196°C à 200°C) après séchage. L'épaisseur du joint dépend de la planéité des substrats, autant que des paramètres de la solution d'assemblage.

Comme la solution d'assemblage est aqueuse et inorganique, il n'y a pas de problème lié au dégazage organique. Les composants assemblés sont compatibles avec les environnements ultravides, et supportent les dépôts [40]. Ils sont relativement peu contraints, usinables et mécaniquement robustes avec une force similaire à celle de composants monolithiques. Les joints réalisés avec le procédé LTB sont résistants aux solvants usuels et ont une bonne durabilité dans l'eau. L'épaisseur du joint peut être contrôlée dans une gamme allant de moins de 100 nm à plus de $2,5\ \mu\text{m}$ [37]. Le lien est optiquement transparent dans les domaines de l'UV, du visible et du proche infrarouge, et est thermiquement stable d'environ -243°C à plus de 700°C [38]. De plus comme le procédé nécessite une faible température ($<120^{\circ}\text{C}$), ceci permet d'assembler une grande variété de matériaux fréquemment utilisés dans des domaines d'application tel le spatial, la microlithographie, et la photonique en général.

Cependant, selon Schott Glass Technologies, cette technologie ne permet pas d'assembler des surfaces traitées. En effet, le procédé dégrade la fonction optique, et le lien bien que mécaniquement robuste n'est alors pas optiquement correct. Cette limitation risque de rendre

ce procédé inadapté à notre application dans le cas d'architecture où l'assemblage est réalisé sur le chemin optique.

III.4.2. Chemically Activated Direct Bonding (CADB)

Afin de pouvoir assembler de grandes surfaces, la société Precision Photonics propose un procédé qui repose sur une activation chimique des surfaces [41].

Avant l'assemblage les surfaces doivent être préparées de manière à retirer les contaminants physiques et chimiques. L'activation des surfaces permet de créer des liaisons pendantes. Ainsi par la mise en contact des deux éléments se créent des liaisons hydrogènes entre les molécules extérieures des surfaces. Les substrats subissent ensuite un traitement thermique de manière à former des liaisons covalentes au travers d'atomes d'oxygène.

Cette méthode nécessite un passage à une température spécifique définie en fonction des matériaux, bien inférieure aux températures de fusion. Ceci rend le procédé utilisable pour une grande variété de matériaux, similaires ou non ; il est limité uniquement en cas de trop grande différence de coefficients d'expansion thermique. Il permet également d'assembler des composants avec des traitements optiques, mais seuls les empilements déposés avec des procédés énergétiques de type IBS ou IAD, sont suffisamment denses pour être assemblés par cette méthode. Les composants ainsi assemblés supportent l'usinage, comme le polissage ou la découpe. Le lien est mécaniquement robuste et aussi transparent que l'adhérence moléculaire. Il peut supporter des gammes de température allant de -80°C à $+50^{\circ}\text{C}$ lorsque les matériaux assemblés sont similaires. Il est qualifié pour les applications spatiales et non soumis aux restrictions d'exportation suivant la norme ITAR.

Cependant, ce procédé industriel reste la propriété de la société Precision Photonics qui se refuse à donner plus d'informations techniques, sans être toutefois opposée à réaliser des assemblages voire à discuter d'un transfert de technologie.

IV. Synthèse des fonctions optiques

Le choix de réaliser un composant filtre allumette par technologie d'assemblage n'est pas sans conséquence sur la synthèse des empilements optiques. En effet, les filtres, qui devront répondre aux spécifications spectrales inhérentes aux filtres allumettes, pourront être agencés suivant différentes architectures. Les contraintes qui en découlent ainsi que l'implication du substrat dans la fonction optique qui pourra alors être différent pour chacune des voies, doivent être prises en compte dès le début de l'étape de formulation des empilements.

Afin de satisfaire les spécifications spectrales, l'empilement est constitué d'un filtre passe-bande, basé sur une structure de type Fabry-Perot multicavités. Cet empilement assure le centrage du filtre ainsi que sa largeur spectrale. Il définit également la raideur des flancs selon la spécification exigée pour le taux de réjection. Il est cependant nécessaire d'étendre les bandes de réjection de ce filtre par des blocages de type passe-bas et/ou passe-haut optimisés en transmission au niveau de la bande passante du filtre.

L'influence de cette nouvelle configuration de composants sur la détermination des empilements optiques est présentée ici au travers de l'exemple d'une bande située au centre du domaine spectral VNIR. Cette bande de longueur d'onde centrale 705 nm et de largeur spectrale FWHM 15 nm, est notamment utilisée dans plusieurs missions en tant que niveau de référence pour la fluorescence, et parce qu'elle permet également d'améliorer les corrections atmosphériques. L'ensemble des calculs théoriques présentés par la suite a été réalisé en incidence normale et faisceau ouvert, de demi-angle $8,15^{\circ}$.

IV.1. Contraintes liées à l'architecture du composant

Le choix de l'architecture du composant implique de nombreuses contraintes sur la synthèse des empilements, en fixant certains paramètres comme notamment le nombre d'interfaces ou bien encore le milieu extérieur. L'adaptation au milieu extérieur, verre ou air dans notre cas, passe par une optimisation des couches externes des empilements, sans remettre en cause leur structure globale.

IV.1.1. Réflexions multiples

Si l'on choisit de réaliser la fonction optique de filtrage spectral en plusieurs empilements déposés, par exemple, sur les différentes faces des allumettes, il convient alors de prendre en compte dans la détermination des performances optiques du filtre les réflexions multiples qui interviennent entre les différentes interfaces traitées. Dans notre cas, les traitements sont considérés non absorbants.

Considérons un substrat de transmission interne T_i dont les deux faces sont traitées (Figure 35).

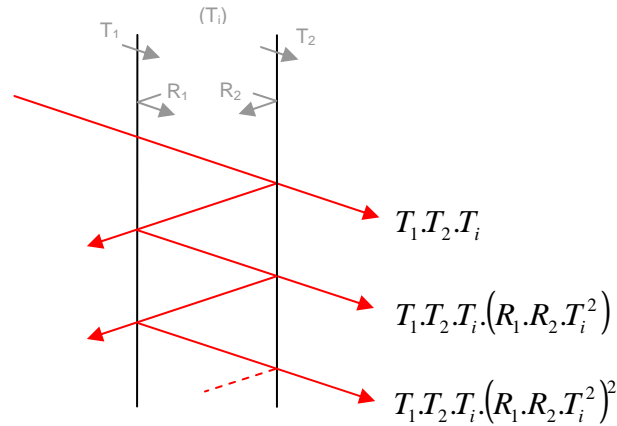


Figure 35 : Réflexions multiples entre 2 faces d'un substrat.

Le phénomène de réflexions multiples qui apparaît alors conduit à ce que la transmission T de l'ensemble ne correspond pas exactement au produit des transmissions $T_1 T_2$ des fonctions optiques de chacune des 2 faces et de la transmission interne T_i du substrat. Il vient en effet :

$$T = T_1 \cdot T_2 \cdot T_i \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (R_1 \cdot R_2 \cdot T_i^2)^n = \frac{T_1 \cdot T_2 \cdot T_i}{1 - T_i^2 (1 - T_1)(1 - T_2)} \quad (9)$$

Dans le cas d'un substrat parfaitement transparent ($T_i = 1$) et en admettant que les traitements des deux faces ont des transmissions identiques ($T_1 = T_2 = T'$), l'expression précédente devient :

$$T = \frac{T'}{2 - T'} \quad (10)$$

Le comportement global sera donc radicalement différent suivant que l'on se trouve dans la bande passante du filtre (T' de l'ordre de 1, comportement global en T'^2) ou dans sa bande de réjection (comportement en $T'/2$). L'écart entre le produit des transmissions et la prise en compte des réflexions multiples est donc essentiellement marqué dans les bandes de réjection, et conduit à une baisse de performance.

Revenons à l'exemple de notre bande spectrale d'étude, et considérons que la fonction globale du filtre est obtenue grâce à l'emploi de deux empilements répartis sur les deux faces d'un substrat transparent (Figure 36), et comparons la transmission de l'ensemble évaluée par simple produit ou lorsque l'on tient compte des réflexions multiples (Figure 37).

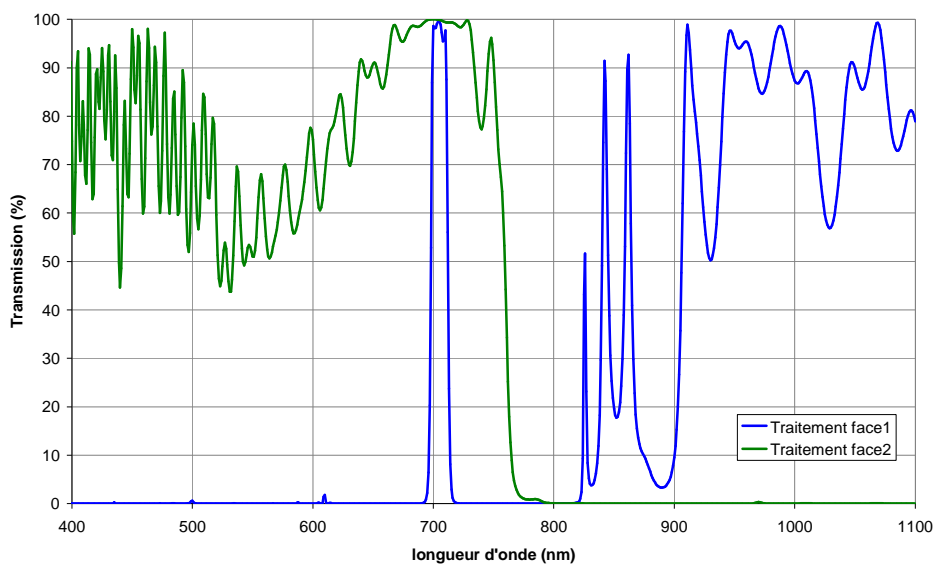


Figure 36 : Transmission des empilements de chacune des faces d'un substrat transparent.

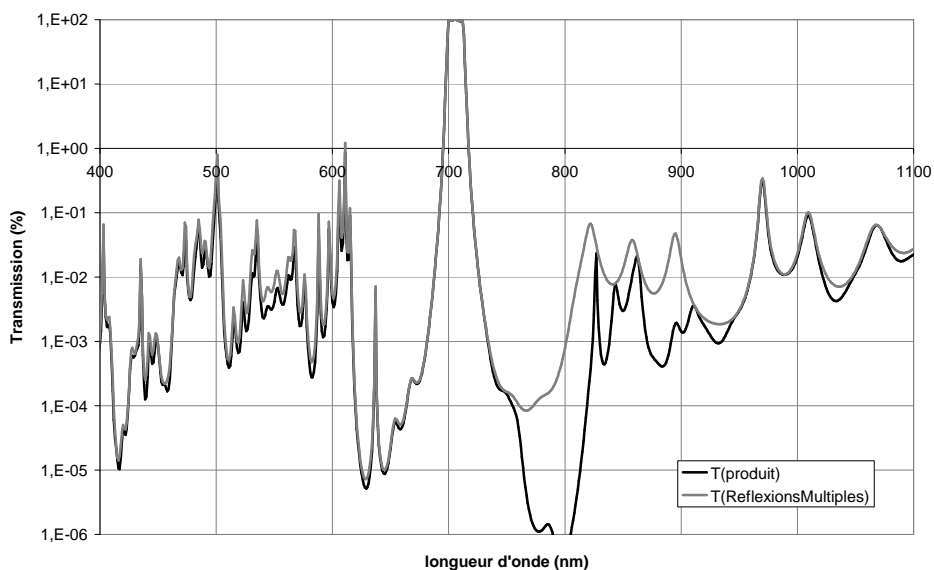


Figure 37 : Comparaison entre le calcul de transmission de l'ensemble en tenant compte des réflexions multiples ou non.

Comme prévu, on constate que l'effet des réflexions multiples est marqué principalement dans les bandes de réjection, là où l'on a un chevauchement de deux coefficients de réflexions élevés. La prise en compte de ces réflexions multiples est donc indispensable pour l'évaluation du taux de réjection.

La même démarche peut être appliquée par récurrence à un plus grand nombre d'interfaces. Dans le cas d'une configuration à trois interfaces, la transmission globale du système peut alors s'écrire de la manière suivante :

$$T = \frac{T_{12}.T_3.T_i}{1 - T_i^2(1 - T_{12})(1 - T_3)} \quad \text{où} \quad T_{12} = \frac{T_1.T_2.T_i}{1 - T_i^2(1 - T_1)(1 - T_2)} = T_{21} \quad (11)$$

On remarquera que dans le cas d'un substrat transparent ($T_i=1$), cette formule est parfaitement symétrique, l'ordre des différentes interfaces n'ayant donc pas d'influence sur l'estimation de la transmission globale, et que dans le cas de substrats absorbants, cette influence est négligeable.

IV.1.2. Nombre d'interfaces

La réalisation du composant par technologie d'assemblage offre la possibilité de réaliser la fonction optique sur plusieurs interfaces. Ainsi, au lieu d'un empilement unique, plusieurs traitements optiques sont déposés sur les différentes faces du ou des substrats. Afin de mettre en avant l'impact du nombre d'interfaces sur le calcul des empilements, on détermine la fonction optique de notre bande spectrale d'étude calculée en utilisant 1, 2 ou 3 interfaces de substrat(s) transparent(s). La Figure 38 présente le profil spectral obtenu dans le cas où la fonction optique est réalisée sur une seule interface, on ne prend pas en compte ici la face arrière du substrat.

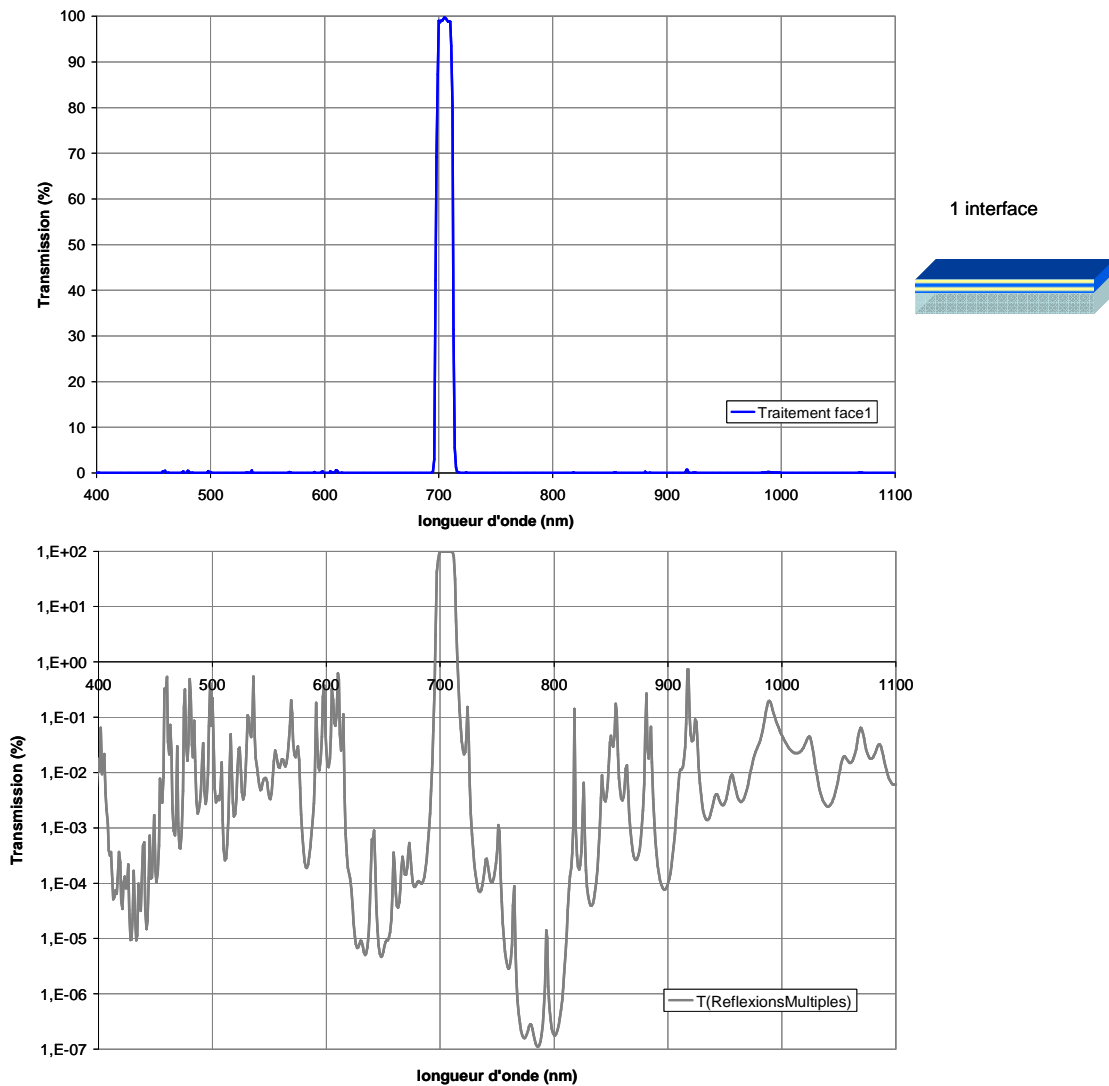


Figure 38 : Transmission théorique de l'empilement réalisant la fonction optique, en échelle linéaire (haut) et logarithmique (bas).

De même, on calcule la fonction optique répartie sur les deux faces d'un substrat transparent. On évalue alors les formules des deux empilements, en choisissant de séparer la fonction élémentaire de blocage passe-bas. On considère alors sur la face 1 du substrat le filtre Fabry-Perot multicavité bloqué dans les courtes longueurs d'onde, et sur la face 2 le blocage passe-bas (Figure 39).

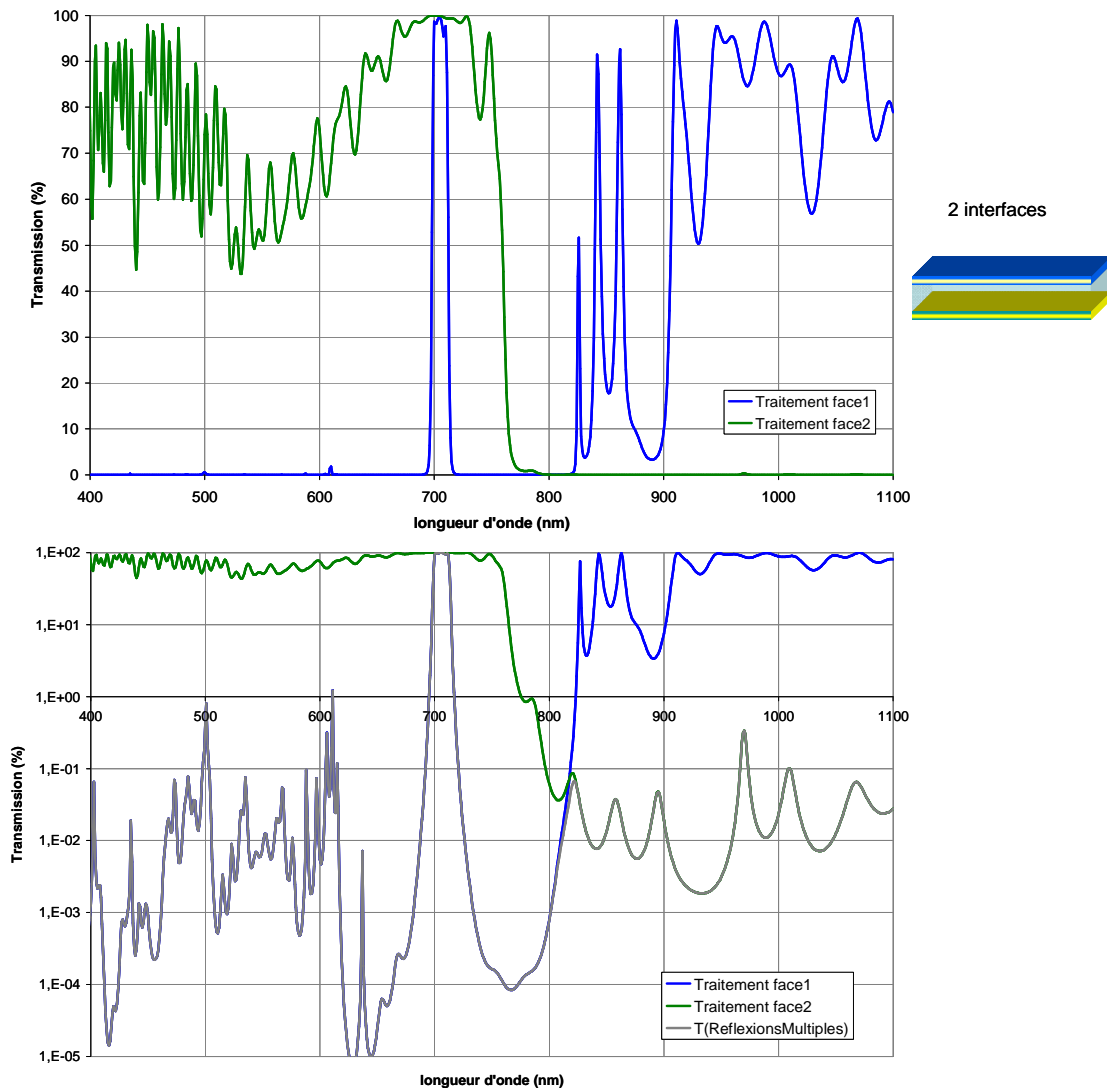


Figure 39 : Transmission théorique des deux empilements ainsi que de la fonction optique totale, optique, en échelle linéaire (haut) et logarithmique (bas).

On réalise enfin la même démarche en répartissant cette fois la fonction optique sur trois interfaces. On choisit alors de séparer chacune des fonctions optiques élémentaires, à savoir le filtre passe-bande, le blocage passe-haut et le blocage passe-bas, sur les différentes interfaces (Figure 40). Dans cette configuration, les empilements sont calculés pour des milieux incidents de type verre, afin d'être au plus proche d'une architecture réalisable. Ce changement de milieu ne remet pas en cause la structure des empilements mais nécessite uniquement l'adaptation des fonctions optiques au milieu extérieur choisi.

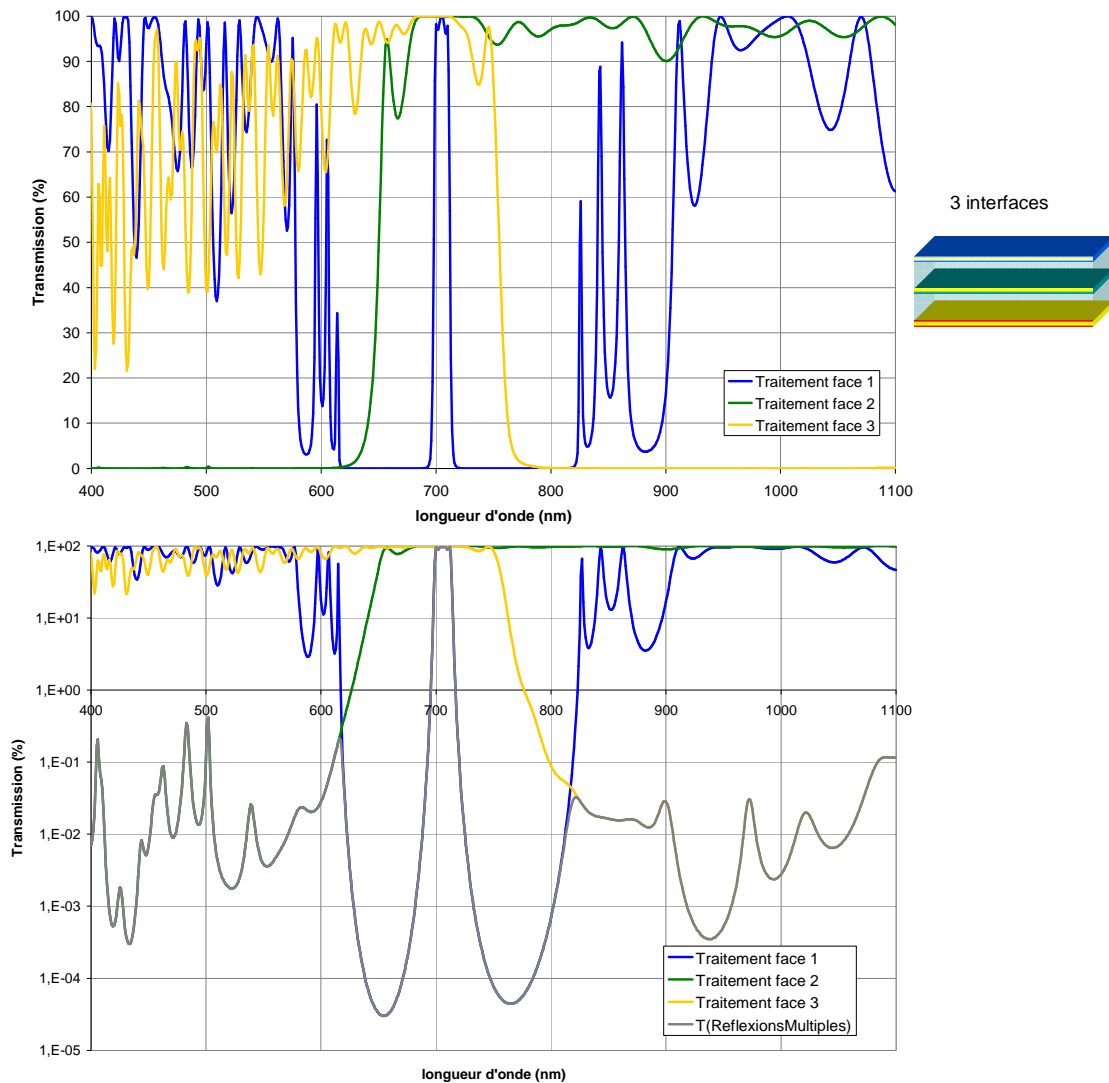


Figure 40 : Transmission théorique des trois empilements ainsi que de la fonction optique totale optique, en échelle linéaire (haut) et logarithmique (bas).

On constate que pour atteindre des performances spectrales données, le nombre total de couches, ainsi que les épaisseurs mécaniques et optiques sont dans les trois configurations du même ordre de grandeur : l'épaisseur optique nécessaire pour réaliser une fonction optique précise est la même que l'empilement soit ou non réparti sur plusieurs interfaces (Tableau 6).

Configuration	Fonction optique	Epaisseur optique (μm)
1 interface	FBE+PH+PB	36,1
2 interfaces	FBE+PH	20,1
	PB	14,0
<i>Total</i>		<i>34,1</i>
3 interfaces	FBE	11,1
	PH	8,8
	PB	13,9
<i>Total</i>		<i>33,9</i>

Tableau 6 : Paramètres des empilements réalisant la fonction optique dans le cas d'une configuration à 1, 2 et 3 interfaces.

Pour des résultats optiques équivalents, avec un nombre total de couches similaire, la répartition de la fonction sur plusieurs interfaces présente des avantages en termes notamment de capacité machine qui peut limiter le nombre maximal de couches que l'on peut déposer, mais également de contrôle de dépôt. L'empilement élémentaire réalisant le filtre passe-bande est de structure quart d'onde, et peut donc être contrôlé avec précision grâce à un contrôle optique direct, le contrôle devient plus délicat lorsque le filtre passe-bande est associé à un filtre dichroïque de structure non quart d'onde. De plus, diminuer le nombre de couches par empilement permet de diminuer la complexité de chacun des dépôts, sans impact négatif sur les performances spectrales. La réalisation des fonctions optiques s'en trouve donc simplifiée, permettant ainsi de réduire les risques technologiques associés. Enfin, le nombre réduit de couches par empilement permet également de diminuer le niveau de contraintes induit par les dépôts et les éventuelles déformations mécaniques des substrats qui en résultent.

IV.2. Influence du substrat dans la fonction optique

La possibilité de répartir la fonction optique sur plusieurs interfaces permet également d'utiliser des substrats de natures différentes pour chacune des voies.

IV.2.1. Verres colorés

Chaque bande étant réalisée sur son propre substrat, celui-ci peut être choisi de manière à diminuer la complexité des empilements en participant à la fonction optique. En effet, grâce à l'utilisation d'un substrat absorbant, de type verre coloré, on peut choisir de faire participer le substrat à la fonction de blocage du filtre et réduire ainsi la complexité des fonctions élémentaires passe-bas et/ou passe-haut.

Il existe différents types de verres colorés classés selon leurs profils de transmission. Dans notre cas, nous nous intéresserons principalement aux verres colorés de type passe-haut (Figure 41). Ces derniers absorbent la lumière sur toute la partie basse du spectre jusqu'à leur longueur d'onde de coupure, définie comme la longueur d'onde pour laquelle la transmission est égale à 50% de la transmission maximale du filtre. La dénomination de ces verres est déterminée d'une part par leur couleur, et d'autre part par la valeur de cette longueur d'onde de coupure.

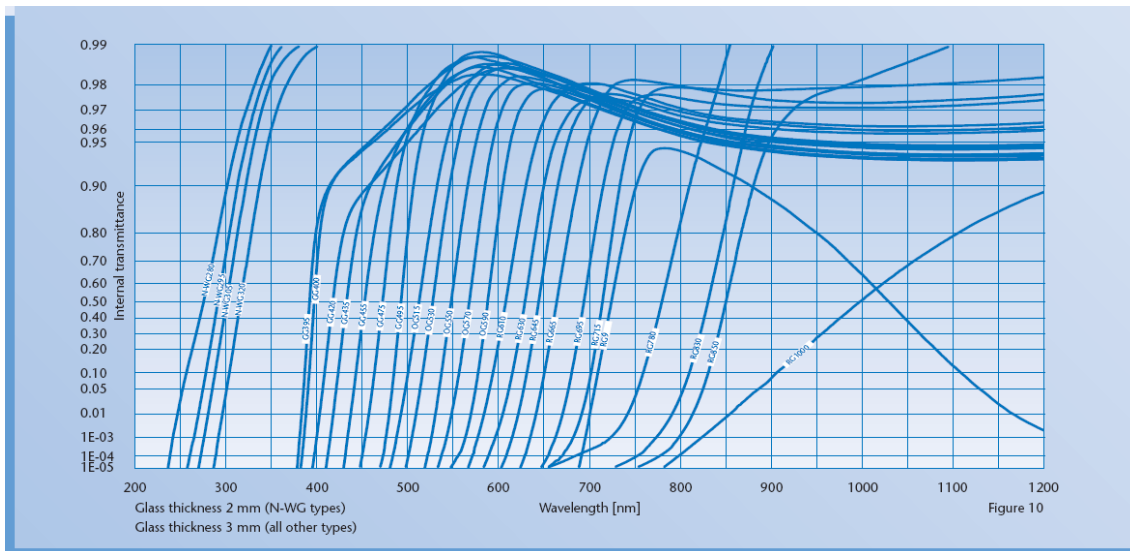


Figure 41 : Transmission interne de verres colorés de type passe-haut (© Schott).

Dans le cas de notre exemple, les verres colorés qui peuvent nous intéresser sont ceux dont la longueur d'onde de coupure se situe typiquement entre 600 et 700 nm. On détermine alors la transmission interne théorique des verres colorés correspondants pour une épaisseur de substrat de 1,5 mm, que l'on compare avec le profil spectral de la fonction élémentaire du filtre à bande étroite (Figure 42).

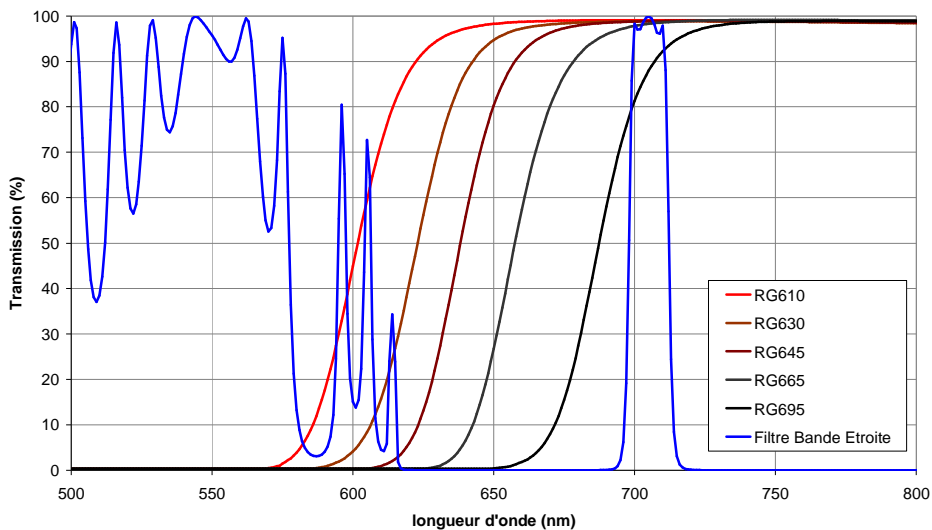


Figure 42 : Choix du verre coloré pour notre bande spectrale d'étude par comparaison du profil de transmission de la fonction élémentaire passe-bande avec celle de différents verres colorés (épaisseur 1,5 mm).

On cherche à ce que le domaine de réjection du verre coloré soit le plus étendu possible pour couper au maximum les remontées du filtre passe bande dans la partie basse du spectre, tout en conservant une bonne transmission au niveau de la bande passante du filtre. Dans notre cas, le verre coloré qui nous paraît le plus adapté est le verre RG645 (« Red Glass » dont la longueur d'onde de coupure se situe à 645 nm).

En considérant uniquement le verre coloré pour le blocage des courtes longueurs d'onde, on estime à environ 2 mm l'épaisseur nécessaire pour atteindre les performances spectrales en termes de réjection, ce qui est particulièrement épais pour des composants filtres allumettes. Il faut alors trouver un compromis pour la réalisation de la fonction optique passe-haut. Celle-ci devra donc être assurée en partie par le substrat et en partie par un empilement multicouche. On choisit de se placer dans une configuration trois interfaces d'épaisseur totale de substrat égale à 1,5 mm (Figure 43). Le nombre de couches de l'empilement passe-haut alors nécessaire pour atteindre des performances de réjection similaires est significativement plus faible, plus de 2,5 fois moins, que dans le cas d'un substrat transparent. Les empilements des fonctions de filtre à bande étroite et de passe-bas restent quant à eux inchangés par rapport à la configuration en substrat transparent.

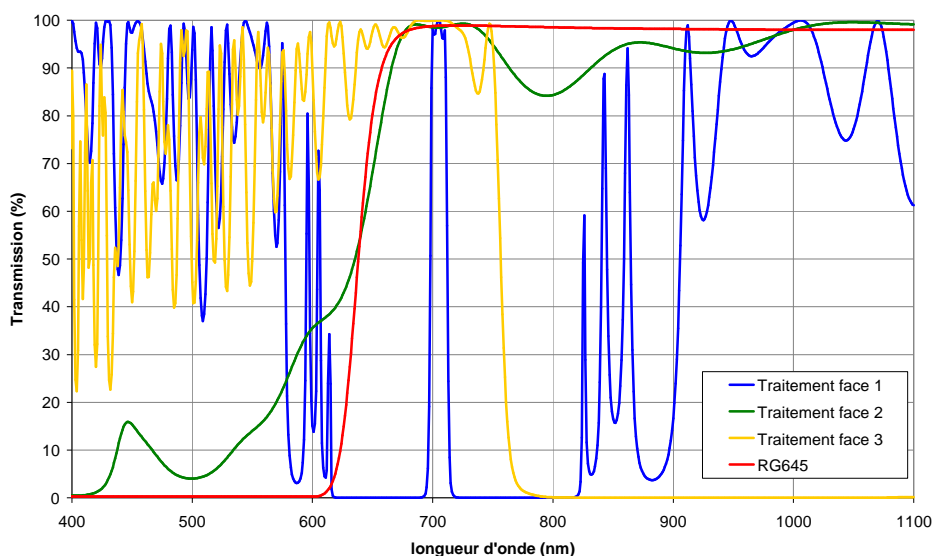


Figure 43 : Transmissions théoriques des trois empilements réalisant la fonction optique sur substrats RG645.

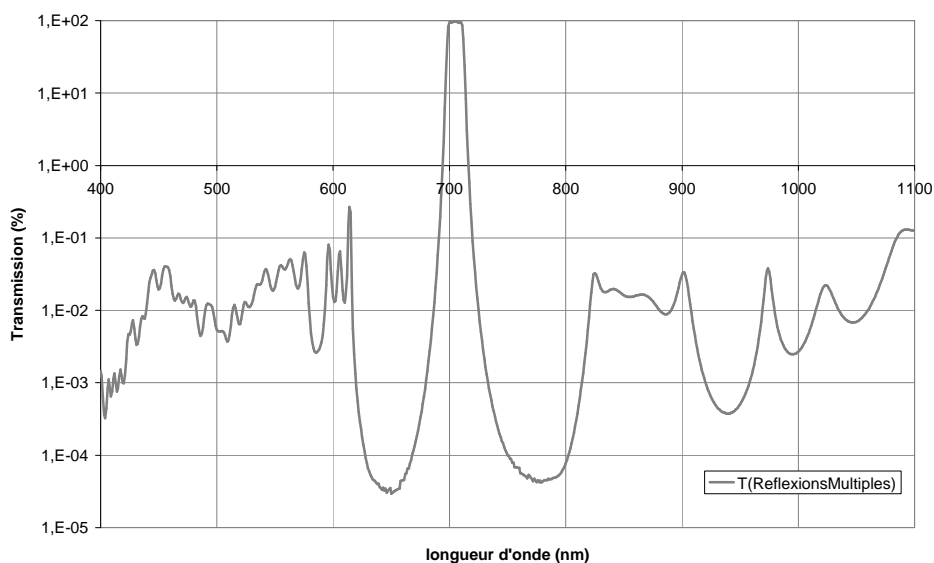


Figure 44 : Profil de transmission de la fonction optique réalisée sur trois interfaces de substrats RG645.

L'utilisation d'un substrat absorbant de type verre coloré participant à la fonction de blocage du filtre permet de réduire le nombre de couches nécessaire à la réalisation de la fonction optique, et par conséquent de diminuer les risques inhérents au dépôt. Cependant, il faut être particulièrement vigilant avec ces substrats particuliers, dont le polissage, moins standard, risque d'engendrer une mauvaise adhésion du traitement et par conséquent une faible tenue mécanique. Il convient également de s'assurer de leur compatibilité avec les contraintes liées à l'environnement spatial, et notamment de valider leur tenue aux radiations.

IV.2.2. Chemin optique

Si l'on choisit pour chacune des voies un substrat dont la transmission est particulièrement adaptée à la bande du filtre, le composant total sera alors constitué d'autant de substrats différents qu'il possède de bandes spectrales, chacun ayant son propre indice de réfraction, et sa propre dispersion, ce qui risque d'engendrer une différence de chemin optique telle qu'elle pourrait s'avérer problématique dans certaines architectures de composants. C'est pourquoi il existe parfois des spécifications fixant la borne maximale acceptable de différence de chemin optique entre les différents filtres d'un même plan focal. Il peut être alors préférable d'opter pour une solution réduisant le nombre de verres colorés différents, et/ou d'adapter pour chacune des voies l'épaisseur du substrat.

En effet, pour minimiser la différence de chemin optique entre les différentes voies du composant, on ne peut agir que sur l'indice et l'épaisseur des substrats. L'épaisseur optique des traitements doit également être prise en compte : or elle dépend des spécificités spectrales de chacune des voies et ne peut donc être ajustée pour satisfaire des contraintes de chemin optique.

Par exemple, si l'on considère 5 voies réparties sur l'ensemble du domaine VNIR, ayant chacune un substrat différent de type verre coloré, alors la différence de chemin optique peut atteindre plusieurs dizaines de microns (Figure 45).

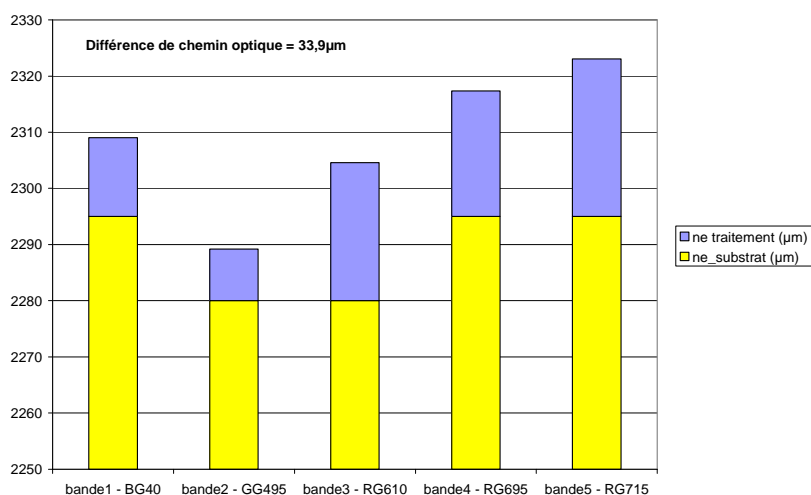


Figure 45 : Exemple de variations du chemin optique entre les différentes voies d'un composant réalisées chacune sur un substrat différent.

Celle-ci peut alors être compensée par une adaptation de l'épaisseur des substrats (Figure 46). Dans le cas où l'on choisit le même substrat pour toutes des voies, alors la différence de chemin optique se résume à la différence d'épaisseur optique des empilements de chaque bande.

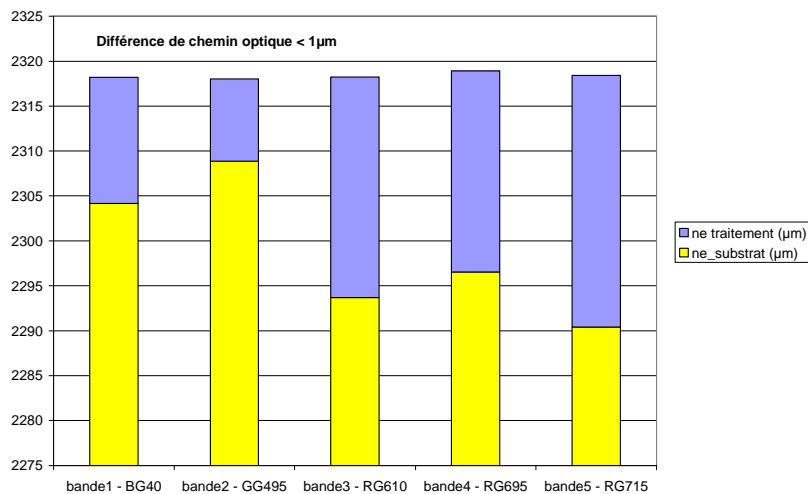


Figure 46 : Minimisation de la différence de chemin optique par adaptation de l'épaisseur du substrat dans le cas de substrats de nature différente.

Notons qu'il n'est pas toujours possible d'obtenir une différence de chemin optique nulle en fonction de l'architecture du composant. En effet, il faudra, par exemple, être particulièrement vigilant dans le cas où les substrats sont collés par les surfaces traitées. En effet, interviennent alors l'indice et l'épaisseur de la colle optique utilisée. Dans certains de ces cas, une diminution de l'épaisseur du substrat peut impliquer une augmentation de l'épaisseur de colle optique, dont l'indice de réfraction est généralement proche de celui du verre. La proximité de ces valeurs d'indice ne permet alors pas de compenser complètement les différences de chemin optique.

V. Conclusion

La réalisation des composants filtres allumettes par technologie d'assemblage offre en plus d'une dissociation des risques inhérents à chaque étape de fabrication, une flexibilité sur le choix de l'architecture globale du composant. Différentes solutions sont en effet envisageables, notamment concernant le choix des substrats de départ portant la fonction de filtrage optique. Ils peuvent être choisis de dimensions supérieures à la géométrie finale des allumettes ou à l'inverse correspondre directement à cette géométrie. Ces deux possibilités présentent des avantages et des inconvénients complémentaires, mais permettent toutes les deux, ce que n'autorisait pas la configuration monosubstrat, de dissocier les risques de dépôt pour chacune des voies, et de pouvoir réaliser une sélection des allumettes à intégrer dans le composant final en fonction de leurs performances spectrales et de leurs cosmétiques. De la même manière les fonctions absorbeurs du composant peuvent être réalisées et mises en forme en minimisant le risque encouru par les filtres.

Le point clef de cette nouvelle démarche de fabrication réside dans l'étape d'assemblage de tous ces substrats indépendants. Parmi la multitude de technologies actuellement présentes sur le marché, certaines d'entre elles ont été identifiées comme adaptées aux besoins particuliers de nos composants. Ceci signifie qu'elles possèdent certaines spécificités leur permettant de répondre aux contraintes qu'imposent d'une part l'architecture globale du composant, et d'autre part l'environnement spatial. On retiendra plus particulièrement trois technologies. Le collage tout d'abord reste la technologie la plus développée et la plus utilisée en matière d'assemblage, grâce notamment à la large gamme d'adhésifs présents sur le marché permettant d'adapter le procédé en fonction des besoins. Il est notamment préconisé dans le

cas d'un assemblage structural, mais peut également être utilisé dans le cas d'un assemblage optique. Dans ce dernier cas, l'adhérence moléculaire semble elle aussi particulièrement adaptée à notre application, notamment du fait de la très bonne qualité optique du lien. Des tests ont été réalisés qui ont permis de valider notre capacité à adhérer des matériaux différents, ainsi que la possibilité de traiter des composants adhérents ou d'adhérer des composants traités. Enfin le procédé d'assemblage par hydratation / déshydratation catalysée par hydroxyde ou HCB (Hydroxyde-Catalysis Bonding) apparaît également comme une solution intéressante dans le cas d'assemblages optiques.

Les conséquences de la réalisation du composant par technologie d'assemblage sur la synthèse des empilements optiques ont également été étudiées, et ce, au travers de l'exemple d'une bande spectrale représentative d'une fonction de filtrage de type filtre allumette. Tout d'abord, l'architecture du composant se répercute de manière directe sur la synthèse des empilements puisqu'elle détermine le nombre d'interfaces sur lesquels peuvent être déposés les traitements optiques. En effet, les bandes spectrales étant réalisées sur des substrats indépendants, il est alors possible d'utiliser plusieurs interfaces sans qu'il y ait nécessairement besoin de traitements identiques pour les différentes voies. La réalisation de la fonction optique de filtrage sur plusieurs interfaces permet en outre de diminuer la complexité de chacun des dépôts, sans pour autant dégrader les performances spectrales. De plus la réalisation des différentes voies sur des substrats indépendants permet d'optimiser chaque substrat en termes de nature et d'épaisseur pour chaque bande spectrale. Ce dernier peut être choisi absorbant et participer ainsi à la fonction de blocage du filtre, ce qui permet de diminuer le nombre de couches nécessaires à la réalisation de la fonction optique et par conséquent la complexité du dépôt associé. Son épaisseur peut également être différente entre chacune des voies de manière à minimiser les différences de chemin optique entre les bandes, ou à obtenir une meilleure planéité de la surface image.

Comme il vient d'être vu, la réalisation de filtres allumettes par technologie d'assemblage offre donc de nombreux degrés de liberté par rapport à la technologie monosubstrat déjà en place, en plus de l'avantage majeur que représente la minimisation des risques. C'est pourquoi deux composants prototypes ont été réalisés suivant cette démarche d'assemblage. Leur architecture et leur procédé de fabrication, ainsi que leurs performances spectrales seront présentés en détails dans le chapitre IV, sachant qu'il est auparavant nécessaire de décrire les moyens développés pour leur métrologie, ce qui sera l'objet du chapitre III.

Chapitre III.

Métrie

Du fait de leurs spécificités optiques et géométriques, la caractérisation spectrale des filtres allumettes nécessite le développement d'un outil de métrologie dédié : il doit permettre de mesurer la transmission du filtre directement dans les bandes avec des conditions d'éclairage représentatives des conditions d'utilisation finale du composant. Tout d'abord, une étude des besoins particuliers de ces composants a permis de définir quelles devaient être les caractéristiques du montage. Puis, un banc de caractérisation dédié aux filtres allumettes a été développé et qualifié. Une étude optique du montage a également été réalisée, mettant en avant les limites du système. Celles-ci imposent notamment la prise en compte dans la mesure d'un substrat de référence.

I. Besoins

Il convient tout d'abord d'analyser les besoins afin de définir le montage à mettre en œuvre. Cette analyse passe par une étude des spécifications optiques et géométriques des filtres allumettes.

I.1. Spécifications optiques

Les filtres allumettes sont des composants fonctionnant uniquement en transmission, il n'y a donc aucun besoin de mesure en réflexion.

Typiquement on souhaite connaître les propriétés spectrales des composants, et plus particulièrement la longueur de centrage et la largeur de bande, avec une précision de l'ordre du nanomètre. Le montage expérimental devra donc permettre des mesures avec une résolution spectrale allant jusqu'à 1 nm. De plus, les calculs théoriques de fonctions optiques nous ont montré qu'il fallait atteindre en moyenne un niveau de transmission de 10^{-2} en dehors de la bande passante pour être conforme aux spécifications de rejection. La dynamique des signaux dans une même configuration de mesure devra donc atteindre 10^4 afin de pouvoir caractériser correctement les filtres. Comme il a été vu précédemment, les bandes spectrales des filtres se situent dans le domaine du visible et du proche infrarouge.

Enfin, du fait de la présence du télescope optique en amont des filtres allumettes, les conditions d'éclairage dépendent de la conception globale de l'instrument. On choisira dans notre cas d'éclairer les filtres en incidence normale et avec un faisceau ouvert. Une ouverture de F/4,5 correspond à une valeur typique des conditions d'utilisation en ouverture de ces composants.

En résumé, le montage devra permettre de réaliser des mesures de transmission en incidence normale avec une résolution spectrale allant jusqu'au nanomètre et une dynamique de mesure de 10^4 , dans le domaine spectral allant du visible au proche infrarouge, en faisceau ouvert à F/4,5.

I.2. Spécifications géométriques

Les spécifications géométriques des filtres allumettes ont été présentées dans la première partie de ce document, et parmi elles, celles qui vont conditionner une partie du dimensionnement du montage expérimental sont les dimensions géométriques des bandes. En effet, on souhaite réaliser les mesures directement dans les bandes du composant sur toute leur longueur. On rappelle que celles-ci ont des dimensions de l'ordre de quelques centaines de microns par quelques centimètres. La résolution spatiale de la mesure devra donc être inférieure à la plus petite largeur géométrique de bande, soit typiquement $250\ \mu\text{m}$. De plus, le porte-échantillon devra être adapté aux dimensions extérieures du composant qui peuvent aller jusqu'à 6 pouces, soit 154 mm.

En résumé, le banc de métrologie mis en place devra permettre de cartographier des composants dont la plus grande dimension peut atteindre 6 pouces, et ce avec une résolution spatiale meilleure que $250\ \mu\text{m}$.

II. Banc de caractérisation

II.1. Principe

Le montage développé ici reprend le principe d'un banc de caractérisation mis en place à l'Institut Fresnel dans le cadre des travaux de thèse de Laetitia Abel-Tiberini pour la mesure de « filtres linéairement variables » [42]. Il s'agissait alors d'effectuer la caractérisation de composants dont les propriétés spectrales varient fortement le long d'une direction privilégiée. Cette particularité impose de réaliser les mesures non pas sur la globalité de la surface de l'échantillon, ce qui aurait pour effet de moyenniser ses propriétés spectrales, mais sur une zone de taille faible et maîtrisée. Pour ce faire, un outil de métrologie adapté avait été développé qui permettait de réaliser des mesures locales à la fois en transmission et en réflexion.

Le principe utilisé pour limiter le diamètre de la zone de mesure consiste à former l'image géométrique d'un diaphragme calibré sur le composant à mesurer, avec un grandissement de 1. Le composant est éclairé en lumière blanche, et un monochromateur est placé en sortie. Pour un maximum de flexibilité, le système est fibré et automatisé. Ainsi le composant placé sur une platine de translation 2-axes peut être cartographié.

Les performances de ce banc rendent possibles des mesures dans le domaine spectral allant de 400 à 1700 nm, avec une résolution spatiale pouvant être choisie entre 2 mm et $100\ \mu\text{m}$ et une résolution spectrale variant entre 0,5 et 5 nm suivant les conditions de mesures. Les conditions d'éclairement sont fixées à 2° d'incidence pour un faisceau ouvert à $1,27^\circ$. La translation du composant s'effectue au moyen de 2 platines d'axes croisés permettant un débattement de 25 mm dans une direction et de 60 mm dans l'autre avec une précision de positionnement de $3\ \mu\text{m}$ [43].

Dans notre cas les besoins optiques et géométriques étant différents, un nouveau montage basé sur ce même principe a été développé pour répondre aux spécifications propres aux filtres allumettes (Figure 47).

II.2.1. Système optique d'entrée

Le système optique d'entrée a pour but de mettre en forme le faisceau : une source blanche est couplée dans une fibre optique dont l'extrémité de sortie est imagée sur un diaphragme calibré.

La source utilisée ici est une lampe Tungstène-Halogène fibrée, choisie pour son étendue spectrale adaptée à notre besoin (son émission utile est comprise entre 360 nm et 2 μm) ainsi que pour sa stabilité permettant des mesures de longue durée [42]. La lumière émise est couplée dans une fibre optique de 200 μm de diamètre de cœur et d'ouverture numérique 0,22. La sortie de cette fibre définit l'objet source de notre système.

La mise en forme du faisceau se fait par un jeu de 2 lentilles montées en configuration télécentrique (Figure 49). Le choix des lentilles est notamment dicté par la spécification d'ouverture du faisceau de mesure (F/4,5).

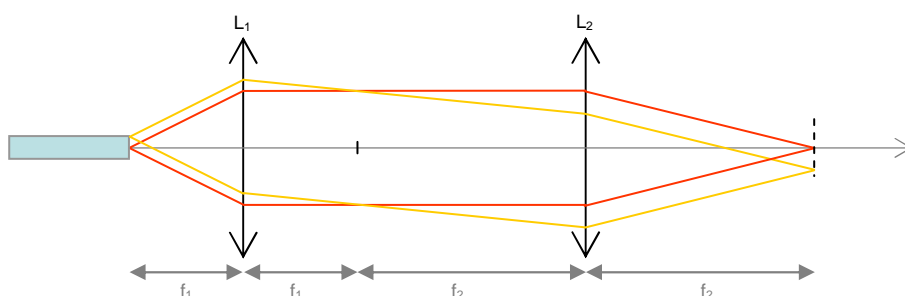


Figure 49 : Schéma du système télécentrique d'entrée.

Compte tenu de l'ouverture numérique de la fibre, ainsi que de la configuration télécentrique du système, une ouverture de faisceau de F/4,5 impose un grandissement f_2/f_1 égal à 2. Les lentilles choisies sont des doublets achromatiques traités antireflet (monocouche MgF_2) de focales 50 et 100 mm pour des diamètres respectivement de 25 et 30 mm. Il faut noter qu'avec de telles ouvertures, on atteint ici les limites des lentilles disponibles « sur catalogue ». De plus, on remarquera qu'il est possible d'insérer un diaphragme au niveau du foyer commun F'_1F_2 ce qui permet d'adapter l'ouverture du faisceau délivré par le système optique d'entrée et d'effectuer des mesures avec une pupille de forme quelconque, rectangulaire par exemple.

La taille maximale de la zone d'analyse est donc fixée à 400 μm , ce qui est suffisant pour les besoins des filtres allumettes. Des diaphragmes placés au foyer image de la seconde lentille permettent une adaptation de la résolution spatiale. Leur insertion engendre toutefois une perte de flux directement proportionnelle au carré de leur diamètre. Cependant, ces pertes restent raisonnables puisque, même avec un diaphragme de 50 μm , le rapport entre flux utile et flux maximal est encore de 1/16. On choisira donc des diaphragmes de diamètres 50 μm , 100 μm ou 200 μm .

L'ouverture importante d'une part et le domaine spectral étendu, visible – proche infrarouge, d'autre part nous faisant craindre la présence d'aberrations dans notre système, une analyse détaillée de la qualité optique a été effectuée avec le logiciel CODE V. L'étude de la position du meilleur foyer montre une forte dépendance à la longueur d'onde (Figure 50). Le système est bien corrigé dans le domaine spectral allant de 500 nm à 700 nm ; pour des gammes spectrales plus étendues, les effets du chromatisme sont importants et devront donc être pris en compte dans la procédure de calibration.

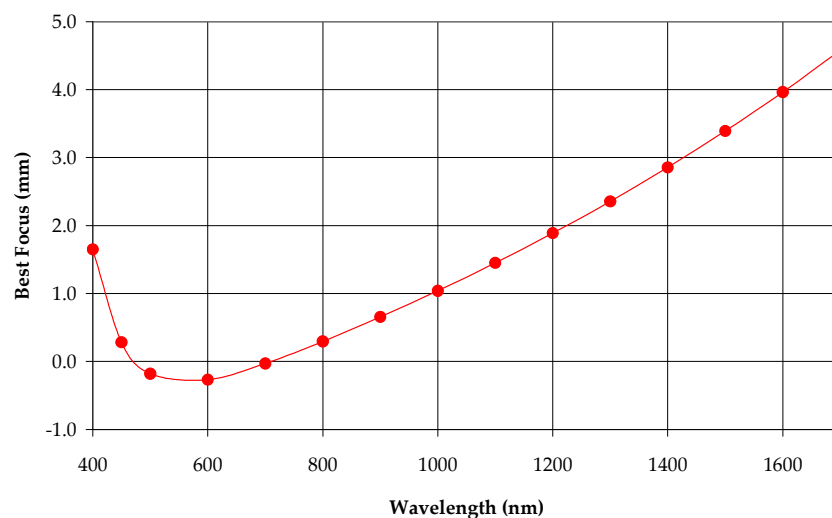


Figure 50 : Evolution de la position du meilleur foyer au voisinage du plan image du système optique d'entrée en fonction de la longueur d'onde.

L'utilisation du logiciel CODE V permet également de déterminer le profil d'éclairement dans l'image de la fibre fournie par le système optique d'entrée, en particulier pour des longueurs d'onde de 600 et 1700 nm, qui correspondent aux positions extrêmes le long de la caustique focale. A chaque fois, le plan d'analyse est positionné au meilleur foyer pour la longueur d'onde correspondante (Figure 51). On constate que la qualité image n'est pas dégradée, et que le diamètre de la tache image en sortie du système correspond bien aux 400 μm attendus. Toutefois, si l'on réalise maintenant cette étude avec un éclairement polychromatique, dans les domaines visible et proche infrarouge, on remarque alors que, même en se plaçant au meilleur foyer du domaine spectral concerné, la tache image présente une légère dégradation, en particulier dans le cas du proche infrarouge, 1100 - 1700 nm (Figure 52).

Cependant il ne faut pas perdre de vue que la tache image délivrée par le système optique d'entrée sera filtrée par le diaphragme : sa qualité n'est donc pas critique pour notre montage. La qualité optique du système relais sera beaucoup plus déterminante.

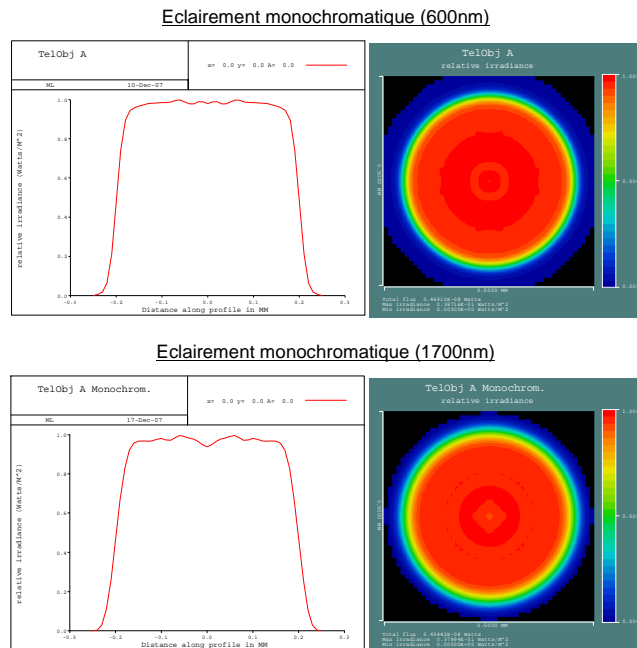


Figure 51 : Tache image en sortie du système optique d'entrée (éclairage monochromatique).

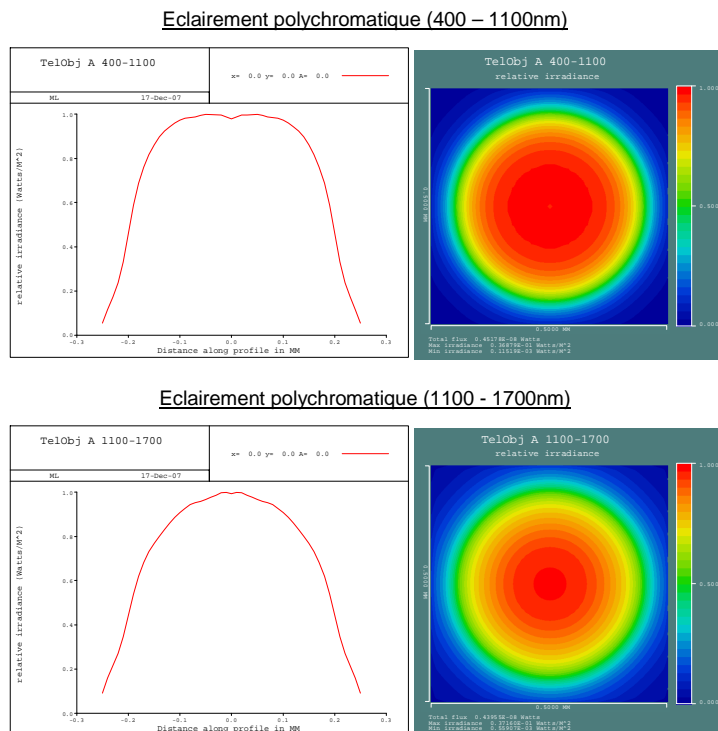


Figure 52 : Tache image en sortie du système optique d'entrée (éclairage polychromatique).

II.2.2. Système optique relais

Le système optique relais forme l'image géométrique du diaphragme sur le composant à mesurer, avec un grandissement de 1, définissant ainsi la zone d'analyse. Il est composé de 2 lentilles identiques de même focale f_2 que la seconde lentille du système optique d'entrée. Un miroir de renvoi fixe l'incidence du faisceau sur le composant tout en permettant de placer ce dernier en position horizontale. Les aspects relatifs au positionnement et au déplacement de l'échantillon par rapport au faisceau lumineux en sont fortement simplifiés. Sur notre montage, on désire que le composant soit éclairé en incidence normale, l'orientation du miroir est donc fixée à 45°.

Comme précédemment, on réalise sous CODE V une étude de la qualité optique du système, et on constate que de la même manière que pour le système optique d'entrée, le système optique relais présente une dépendance de la position du meilleur foyer avec la longueur d'onde (Figure 53).

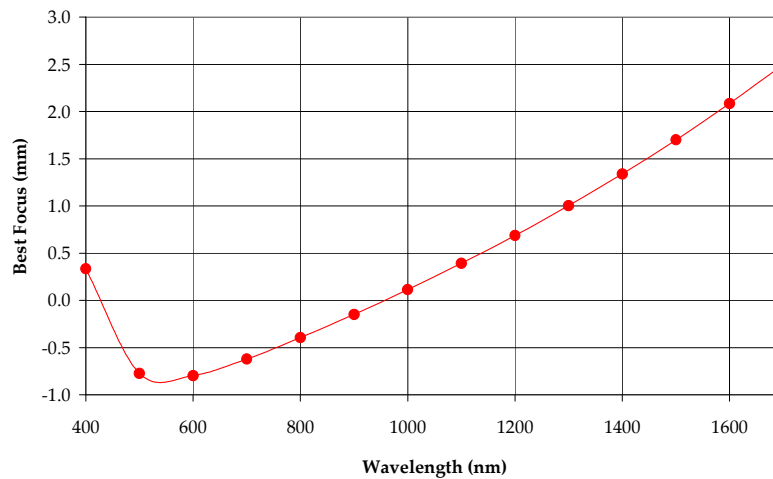


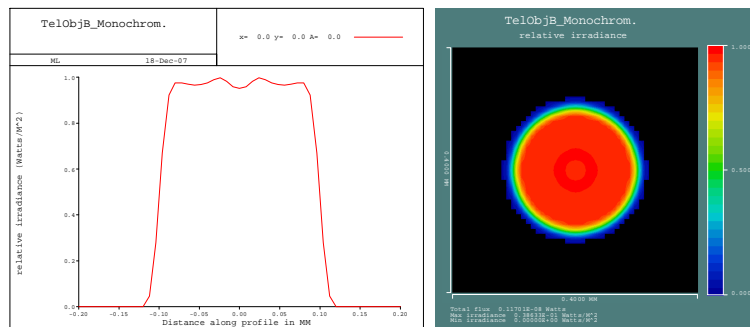
Figure 53 : Position du meilleur foyer en sortie du système optique relais en fonction de la longueur d'onde.

On évalue également le profil d'éclairement dans l'image en sortie du système dans l'hypothèse où l'on choisit en entrée le diaphragme de 200 μm .

Dans le cas d'un éclairage monochromatique, aux longueurs d'onde extrêmes de la caustique soit 500 et 1700 nm, on constate à nouveau qu'en se plaçant au meilleur foyer de la longueur d'onde concernée, la qualité image n'est pas dégradée (Figure 54). Par contre, en éclairage polychromatique, la qualité image obtenue est tout à fait satisfaisante malgré une refocalisation au meilleur foyer (Figure 55). Ce phénomène est beaucoup plus critique dans le cas du système relais puisqu'il détermine la résolution spatiale de la mesure.

Il convient donc d'analyser si cette dégradation de la qualité image peut avoir des conséquences importantes sur la caractérisation des performances photométriques d'un filtre allumette.

Éclairage monochromatique (500nm)



Éclairage monochromatique (1700nm)

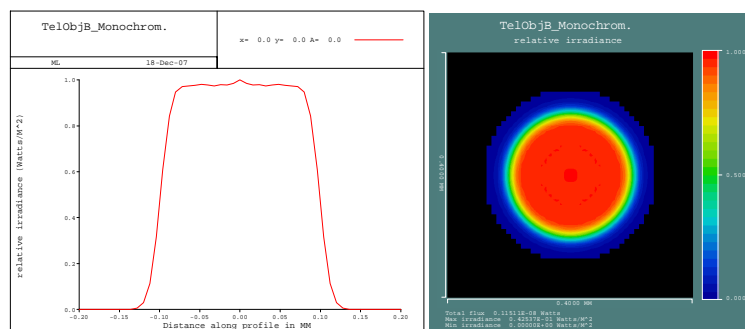
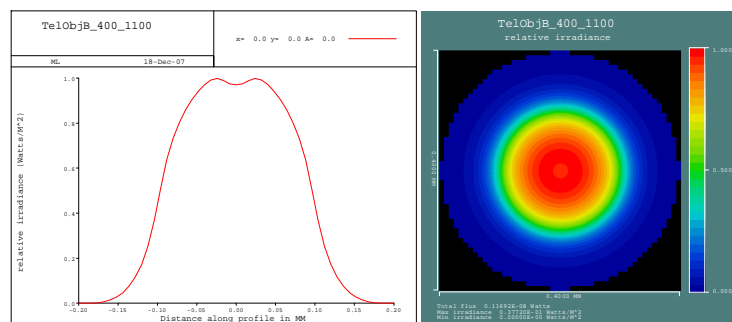


Figure 54 : Tache image en sortie du système optique relais dans le cas du diaphragme de 200 μm (éclairage monochromatique).

Éclairage polychromatique (400 - 1100nm)



Éclairage polychromatique (1100 - 1700nm)

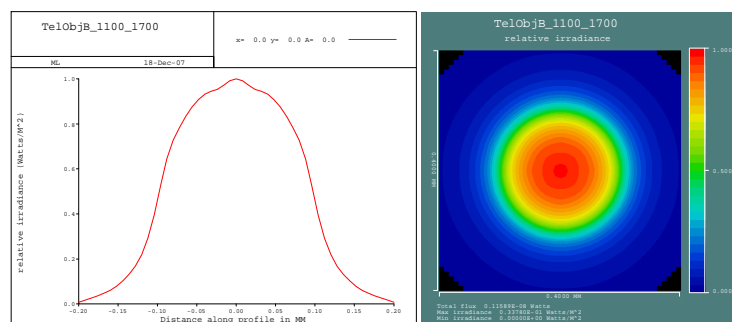


Figure 55 Tache image en sortie du système optique relais dans le cas du diaphragme de 200 μm (éclairage polychromatique).

La Figure 56 nous ainsi le filtrage spatial que va réaliser le filtre allumette de 250 microns de large et l'impact de ce filtrage sur la transmission apparente du composant. On constate que dans le cas d'un diaphragme de 200 μm , (respectivement 50 μm) 95,0 % de l'énergie (respectivement 98,8 %) est transmise au travers du diaphragme de champ que constitue ici le filtre allumette.

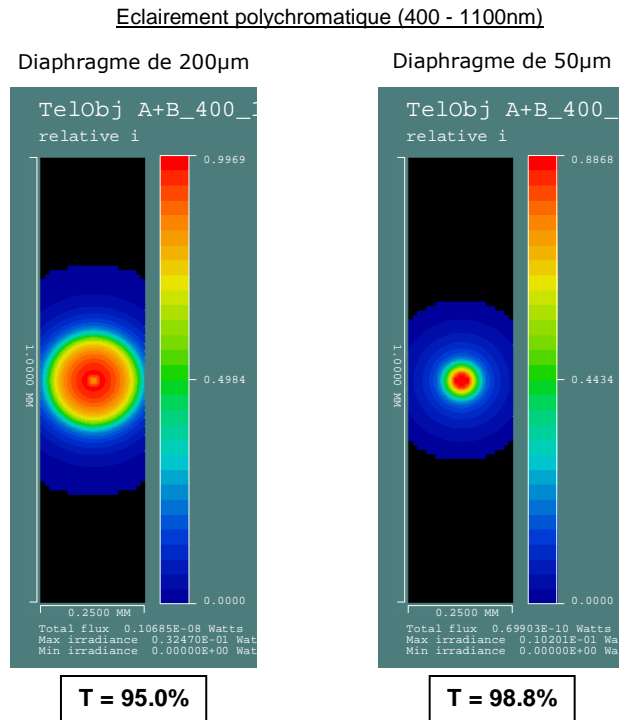


Figure 56 : Filtrage spatial réalisé par une fente de 250 microns de large au niveau du plan image de l'ensemble système optique d'entrée/diaphragme/système optique relais.

Une autre approche possible consiste à étudier à l'aide du logiciel CODE V l'évolution du flux total transmis lorsque l'on déplace un couteau dans le plan image (Figure 57).

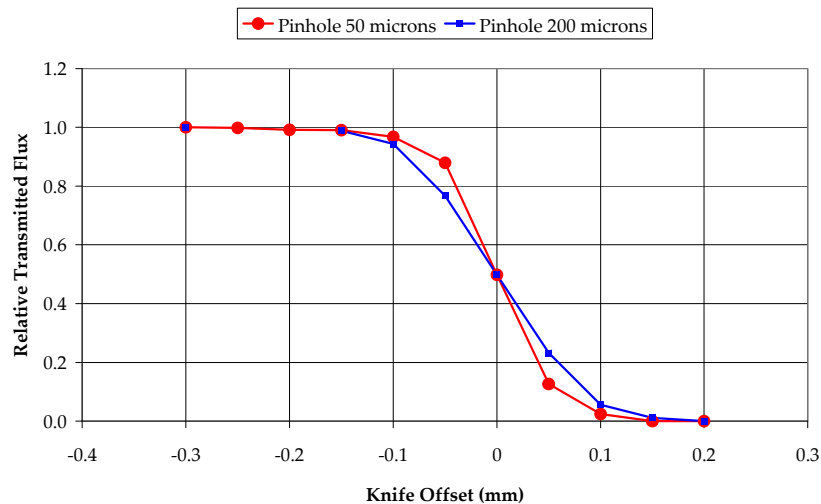


Figure 57 : Evaluation théorique de l'évolution relative du flux transmis lorsque l'on déplace un couteau dans le plan image (domaine spectral 400 – 1100 nm).

II.2.3. Système optique de sortie

Le système optique de sortie, similaire au système optique d'entrée, couple la lumière transmise par le composant dans une fibre optique connectée à un analyseur optique de spectre.

Afin de faciliter le couplage dans la fibre, le grandissement du système de sortie a été choisi plus faible que celui du système d'entrée, nous laissant ainsi des tolérances de réglage plus importantes aussi bien en axial, en transverse qu'en angulaire. Les lentilles constituant ce système sont des doublets achromatiques traités antireflet (monocouche MgF_2) de focales 65 et 100 mm ce qui fixe le grandissement à environ 1,5.

L'analyseur de spectre utilisé est un appareil de marque ANDO modèle AQ-6315A, pouvant fonctionner au choix de l'utilisateur en mode simple ou double monochromateur. Il couvre une gamme spectrale qui s'étend de 400 à 1700 nm, ce qui nous fixe le domaine de mesure accessible. La fibre connectée sur l'analyseur joue le rôle de fente d'entrée du monochromateur, le choix de son diamètre de cœur définit donc la résolution spectrale de la mesure. Cette dernière varie alors entre 5 nm pour une fibre de 600 μm et 0,1 nm pour une fibre de 50 μm .

On notera cependant que le choix des résolutions spectrale et spatiale n'est pas complètement libre. En effet, si l'on désire, par exemple, une faible résolution spectrale, on doit choisir une fibre de sortie de petit diamètre de cœur. La taille de la zone d'analyse sur l'échantillon devra donc être faible afin que l'ensemble de la lumière puisse être couplée dans la fibre de sortie, ce qui nous impose une faible résolution spatiale.

Comme pour les 2 systèmes précédents, on réalise une analyse de la qualité optique avec le logiciel CODE V.

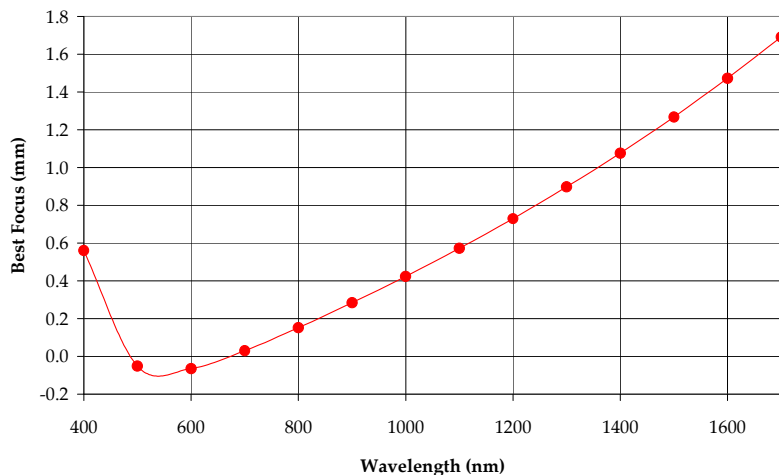
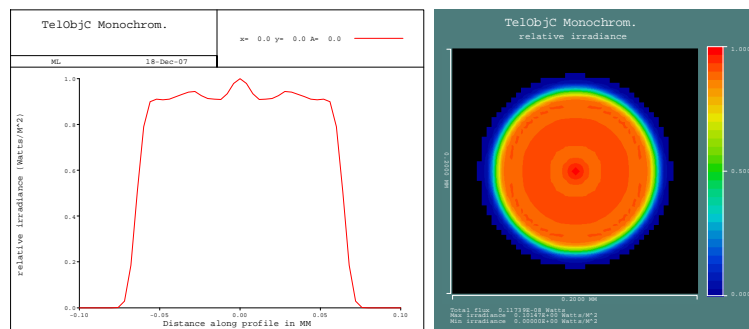


Figure 58 : Position du meilleur foyer en sortie du système optique de sortie en fonction de la longueur d'onde.

Les résultats de cette analyse sont similaires à ceux obtenus pour les systèmes d'entrée et relais, à savoir une dépendance de la position du meilleur foyer en fonction de la longueur d'onde (Figure 58). Il en découle une dégradation de la tache image en éclairage polychromatique (Figure 60) par rapport à un éclairage monochromatique (Figure 59), malgré une refocalisation au meilleur foyer du domaine spectral considéré.

Eclairement monochromatique (500nm)



Eclairement monochromatique (1700nm)

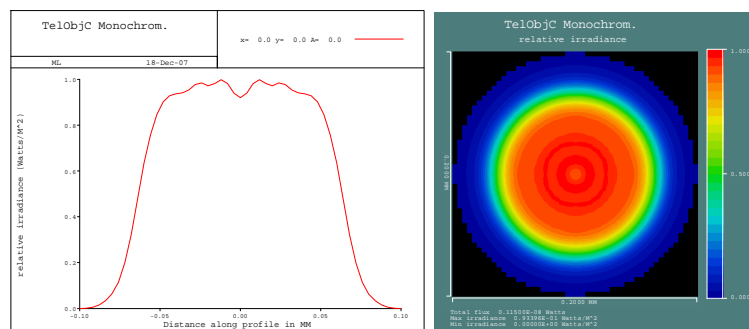
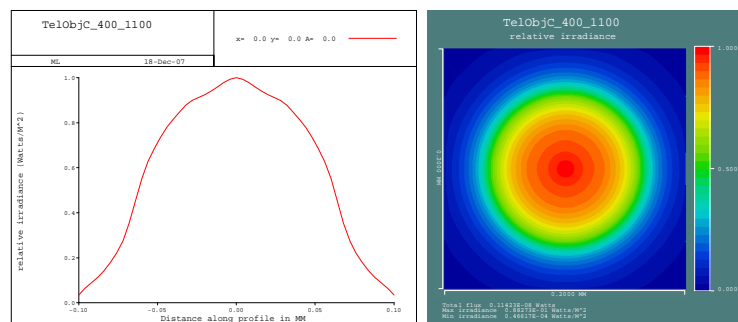


Figure 59 : Tache image en sortie du système optique de sortie pour une taille de zone d'analyse de 200 µm (éclairement monochromatique).

Eclairement polychromatique (400 - 1100nm)



Eclairement polychromatique (1100 - 1700nm)

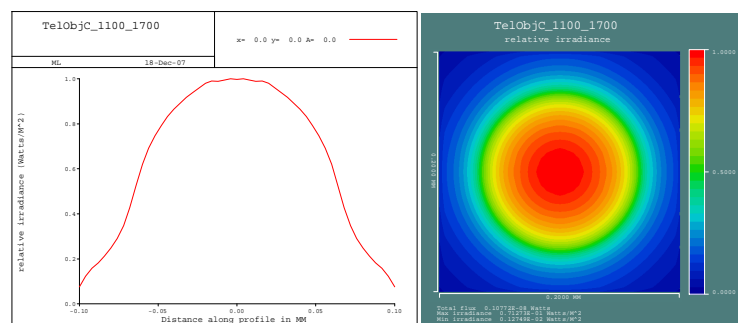
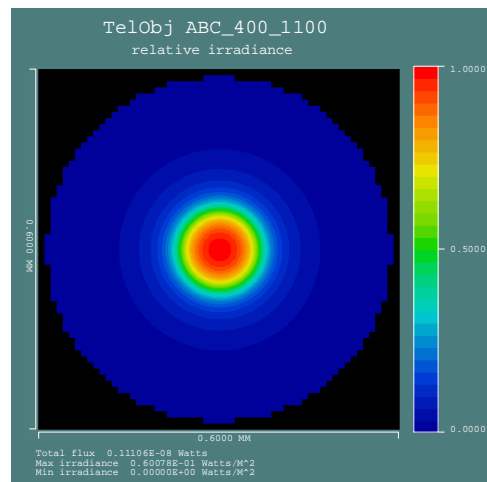


Figure 60 : Tache image en sortie du système optique de sortie pour une taille de zone d'analyse de 200 µm (éclairement polychromatique).

Cependant, comme dans le cas du système optique d'entrée, cet effet n'est pas critique pour le système de sortie, qui réalise simplement le couplage de la lumière transmise par le composant dans la fibre de sortie.

Afin de définir l'impact de ces effets sur le couplage dans la fibre de sortie, une étude globale du montage est alors réalisée prenant en compte les 3 systèmes optiques, ainsi qu'un substrat placé dans le plan de l'échantillon. Ce substrat est supposé être en N-ZK7 et présenter une largeur de 1,05 mm pour une épaisseur de 0,75 mm.

Eclairement polychromatique (400 - 1100nm)



Diaphragme de 200µm - Fibre de 600µm

Figure 61 : Tache image du montage complet sur la fibre de sortie.

On constate alors que malgré un élargissement de la tache image, l'ensemble de la lumière est couplée dans la fibre de sortie de diamètre de cœur 600 µm, dans le cas du diaphragme de 200 µm (Figure 61).

II.3. Automatisation

Dans le but de faciliter les mesures et de permettre la réalisation de cartographies, le banc est automatisé. Un programme contrôlant à la fois l'analyseur de spectre et la platine de translation a donc été développé.

II.3.1. Déplacement de l'échantillon

Pour pouvoir répondre aux besoins de cartographie des composants présentant les dimensions les plus importantes, l'échantillon est placé sur une platine de translation motorisée de débattement 6" par 6" (Figure 62). La platine choisie est un modèle de marque Prior H105, programmable, qui permet la réalisation de cartographies automatiques avec une précision de positionnement de l'ordre du micron.

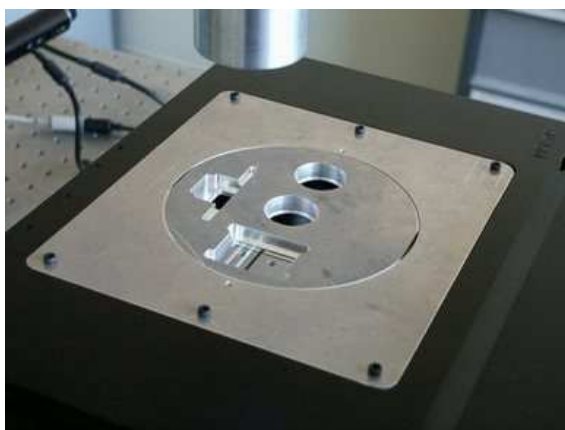


Figure 62 : Photographie d'échantillons placés sur la platine de translation.

II.3.2. Extraction des principales caractéristiques spectrales

Le programme d'automatisation du banc propose à la fin des acquisitions de calculer les principales caractéristiques spectrales du composant. Ainsi, à l'issue de la mesure, la conformité du composant avec les spécifications de départ peut être immédiatement validée notamment en termes de centrage, de largeur de bande ou de réjection. Ces caractéristiques sont calculées selon les formules présentées lors du calcul théorique des empilements.

III. Performances

III.1. Stabilité

Afin de tester la stabilité des mesures, la transmission d'une allumette de N-ZK7 non traitée a été mesurée en différents points.

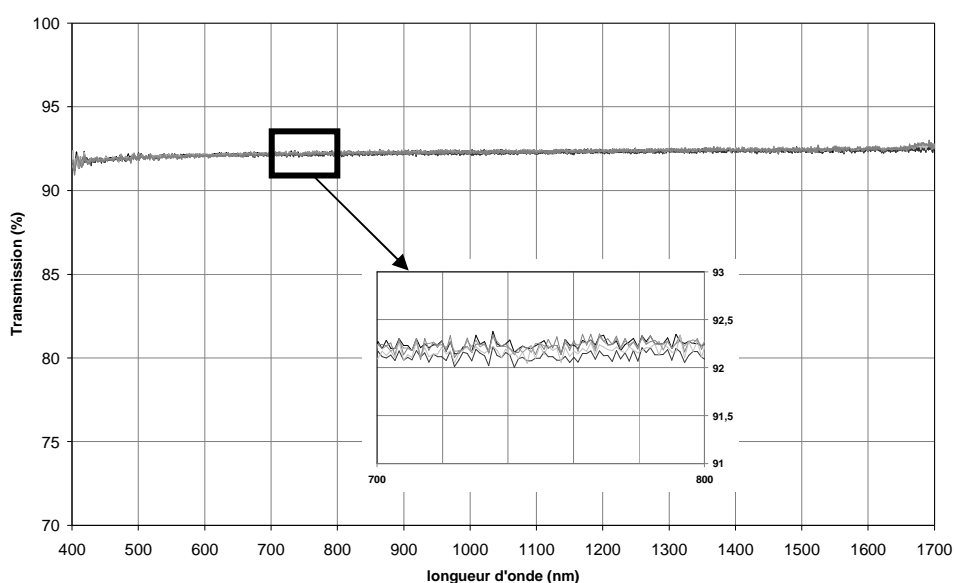


Figure 63 : 5 points de mesures le long d'une allumette de N-ZK7 (Source Halogène, Résolution : spatiale \rightarrow 200 μ m – spectrale \rightarrow 5 nm).

On constate alors que les courbes de transmission des différents points de mesures se superposent à mieux que 0,5 % près, ce qui valide la stabilité de notre montage (Figure 63).

Différentes mesures ont également été réalisées en obturant le faisceau au niveau du système d'entrée, afin d'évaluer la stabilité du signal d'obscurité. Là encore, on constate que ces différentes acquisitions du courant d'obscurité se superposent de manière tout à fait satisfaisante (Figure 64).

III.2. Dynamique de mesure

Si l'on superpose maintenant à ces acquisitions de courant d'obscurité une acquisition du flux transmis à vide (c'est-à-dire sans échantillon) pour un diaphragme de 200 μm , on a accès à la dynamique de mesure, qui se trouve globalement en accord avec celle requise, soit 10^4 (Figure 64).

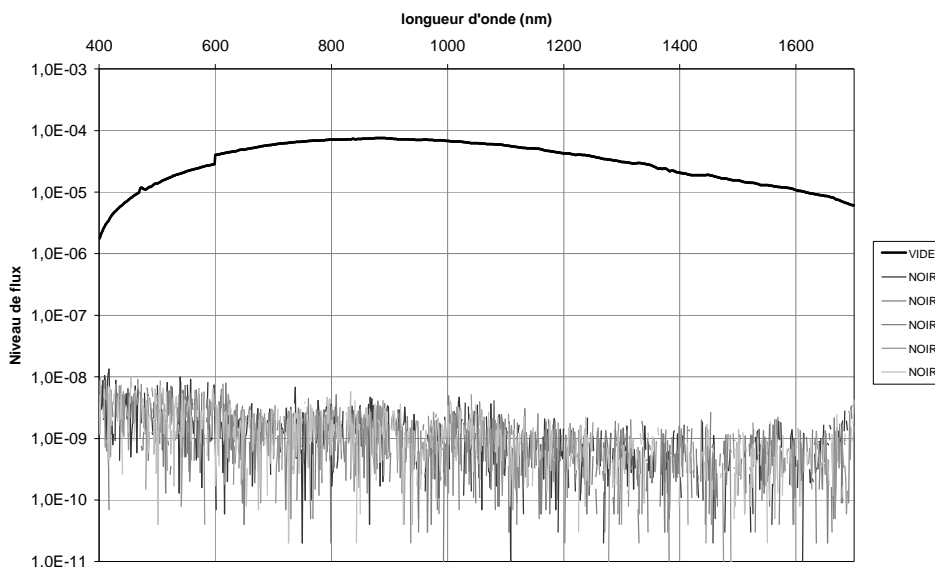


Figure 64 : Comparaison des niveaux de flux entre différentes acquisitions du signal d'obscurité et le signal à vide (diaphragme de 200 μm).

III.3. Résolutions

III.3.1. Résolution spatiale

La résolution spatiale est définie par le choix du diaphragme, mais dépend également de la qualité optique du système relais. Afin d'estimer la taille réelle du faisceau d'analyse au niveau du composant, on utilise la méthode du « Foucaultage » : on place une lame au niveau du porte-échantillon, et on mesure le flux transmis lors d'une coupe progressive du faisceau (Figure 65). Ainsi on peut déterminer le diamètre de ce faisceau dans le plan de l'échantillon pour chacun des diaphragmes utilisés.

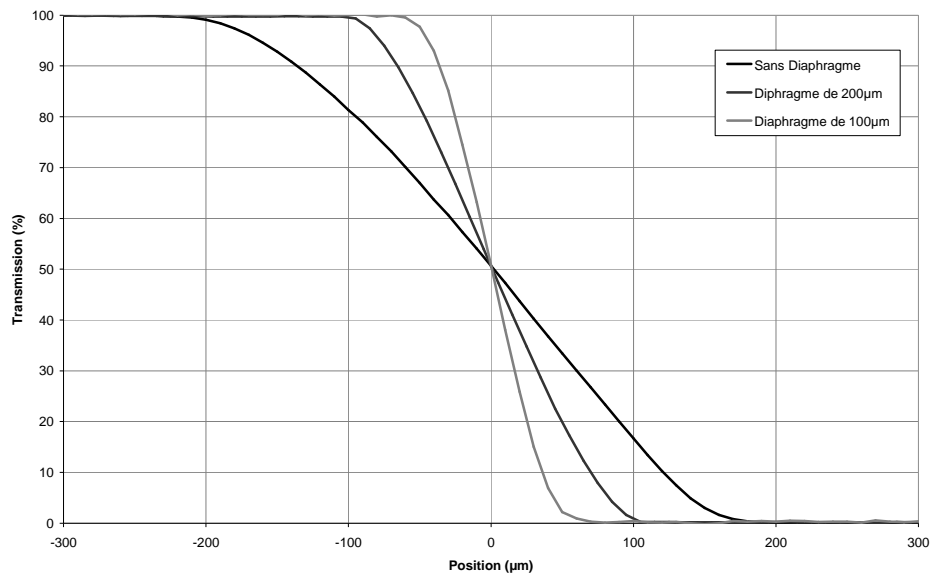


Figure 65 : Estimation de la taille du faisceau à 500 nm sans diaphragme, pour les diaphragmes 200 et 100 μm .

Si, à partir de ces mesures, on estime la taille du faisceau à la longueur d'onde de 500 nm, pour laquelle le chromatisme du montage est minimal, on retrouve les valeurs attendues, à savoir notamment un faisceau de diamètre 400 μm dans le cas où aucun diaphragme de filtrage spatial n'est inséré dans le plan image du système optique d'entrée (Figure 66).

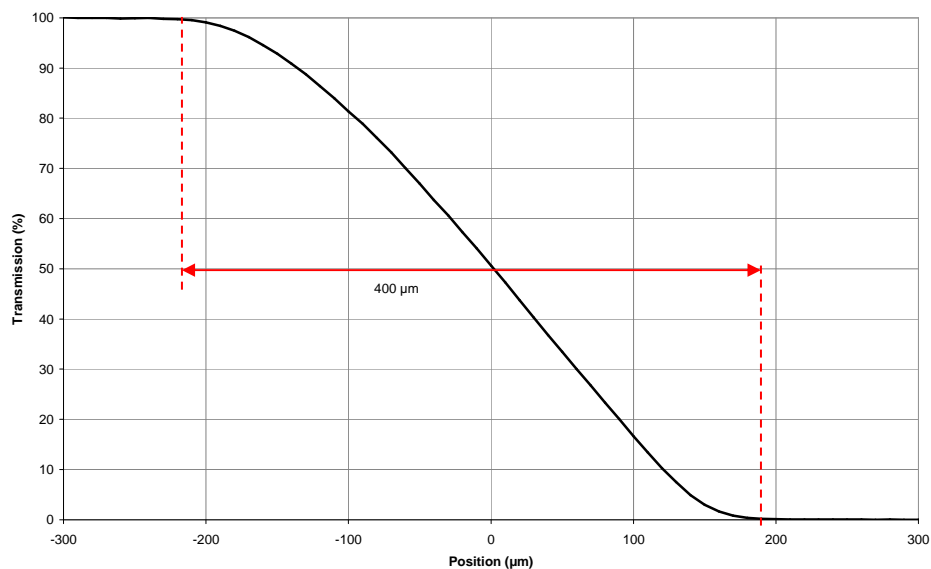


Figure 66 : Détermination expérimentale du diamètre du faisceau dans le plan image, cas sans diaphragme.

On remarquera que ces mesures permettent également de quantifier de manière expérimentale les aberrations chromatiques de notre montage. En effet, si l'on prend l'exemple du diaphragme de 200 μm de diamètre, on constate que la taille du faisceau dans le plan de l'échantillon dépend de la longueur d'onde et que celle-ci est minimale, et égale à 200 μm , pour le domaine spectral 450 – 750 nm (Figure 67).

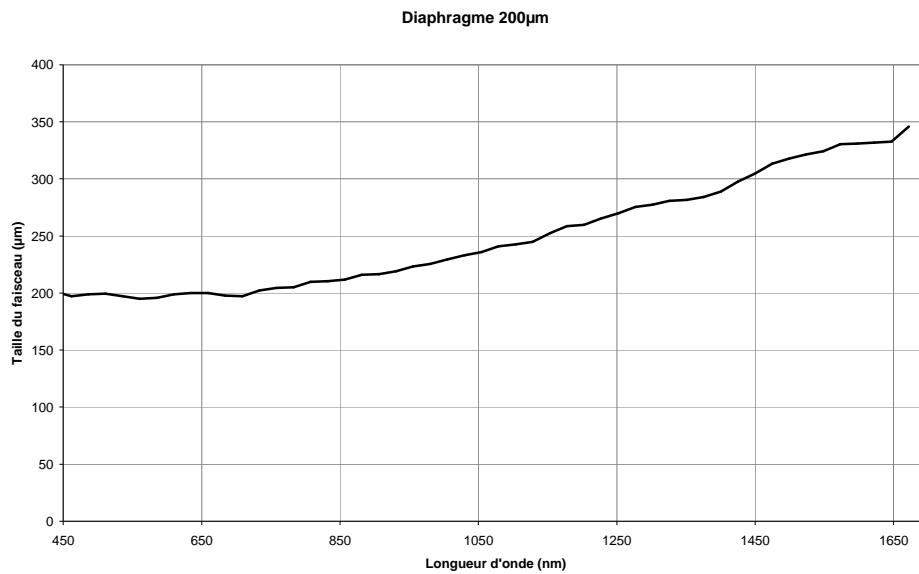


Figure 67 : Evaluation expérimentale de la taille du faisceau dans le plan de l'échantillon en fonction de la longueur d'onde (cas du diaphragme de 200 μm).

III.3.2. Résolution spectrale

La fibre de sortie, reliée directement à l'analyseur de spectre, joue le rôle de fente d'entrée du monochromateur, et fixe donc par son diamètre de cœur la résolution spectrale du montage. Afin de confirmer les données fournies par le constructeur de l'analyseur de spectre, la source blanche est remplacée par un laser Hélium-Néon centré à 632,8 nm, et on mesure pour plusieurs fibres de sortie la réponse de notre montage.

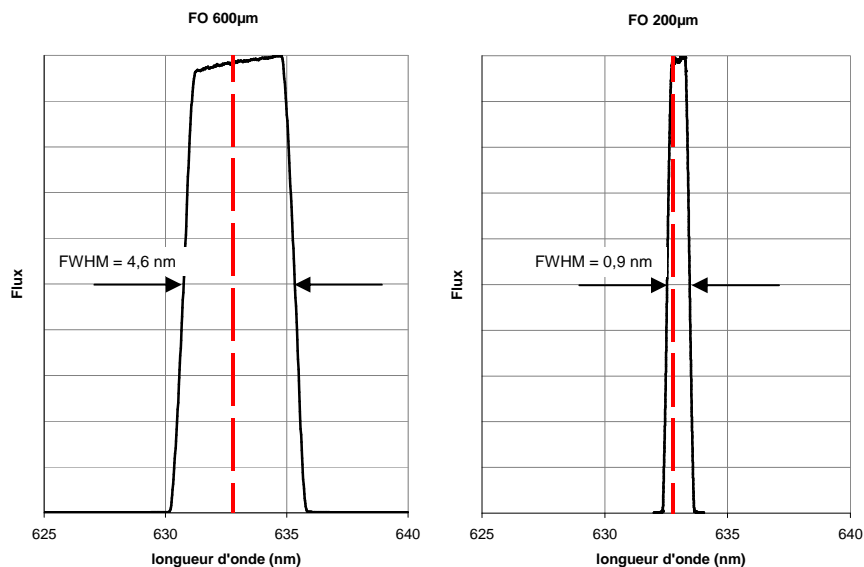


Figure 68 : Mesures du spectre d'un laser Hélium-Néon pour une fibre de sortie de diamètre de cœur 600 μm (gauche) et 200 μm (droite).

On évalue alors expérimentalement la résolution spectrale en estimant l'élargissement de la raie du laser Hélium-Néon (Figure 68). Avec une fibre de sortie de 600 μm de diamètre de

cœur, on estime à 4,6 nm la largeur à mi-hauteur du profil mesuré. Cette valeur est conforme à la performance annoncée par le constructeur pour ce type de fibre (5 nm). De même, avec la fibre de 200 μm de diamètre de cœur, on estime la résolution spectrale à 0,9 nm, ce qui est, à nouveau, conforme à la donnée constructeur (1 nm).

III.4. Lumière parasite

Comme il a été décrit précédemment, le banc est configuré de telle sorte qu'il y ait conjugaison entre le trou source et le composant. La partie de la lumière réfléchiée par le composant est donc imagée à nouveau sur le trou source. Du fait des effets des aberrations, la tache image est élargie de sorte que toute la lumière ne repasse pas dans le trou de filtrage et qu'une partie vient donc se réfléchir sur la monture métallique du diaphragme et est renvoyée en direction de l'échantillon. Cette lumière parasite est alors à nouveau réfléchiée ou transmise par le composant... Au final, une partie de la lumière réfléchiée par le composant est donc collectée dans la fibre de sortie, faussant ainsi les mesures de transmission.

L'importance de ce phénomène parasite dépend des propriétés optiques de l'échantillon mesuré (facteur de réflexion faible ou élevé) ainsi que de l'utilisation ou non d'un verre de référence pour calibrer les mesures. Cet effet est particulièrement marqué lors de la caractérisation d'un traitement antireflet mettant en œuvre une mesure de référence sur un verre nu. En effet, la réflexion sur l'échantillon traité peut être considérée comme négligeable, il n'y a donc pas dans ce cas de contribution parasite. Ce n'est pas le cas de la référence dont la mesure se trouve alors surestimée, ce qui a pour conséquence de sous-estimer la valeur de la transmission du traitement antireflet.

La Figure 69 montre que l'erreur dépend du diamètre choisi pour le diaphragme. En effet selon le diaphragme mis en place, plus ou moins de flux réfléchi est renvoyé vers l'échantillon. On notera que l'erreur est en partie chromatique du fait des aberrations mentionnées précédemment.

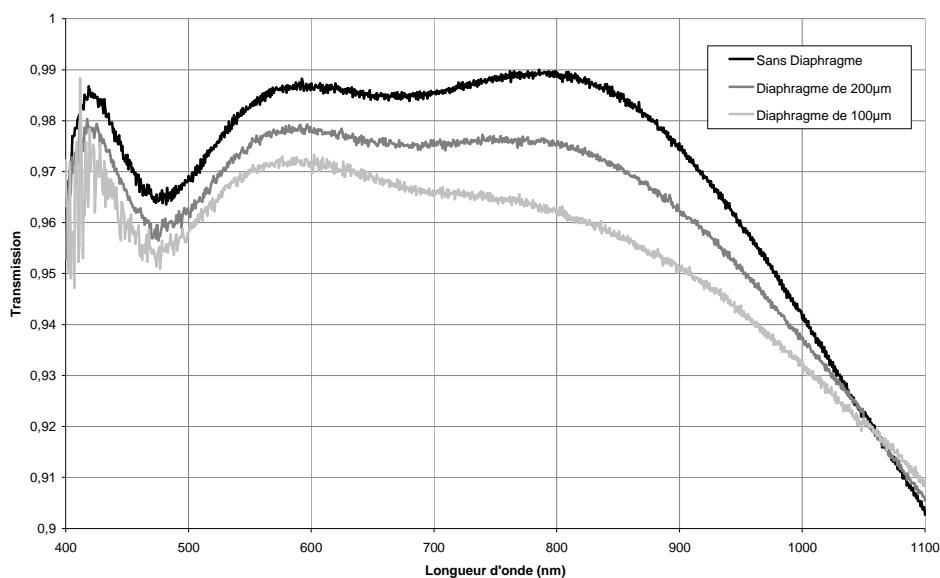


Figure 69 : Mesures d'un témoin antireflet sans diaphragme et pour les diaphragmes 200 et 100 μm .

Une solution pour s'affranchir de ce faisceau parasite consiste à le dévier en dehors du système à l'aide d'une inclinaison du diaphragme. La Figure 70 permet de comparer les mesures obtenues en inclinant ou non le diaphragme par rapport à l'axe optique.

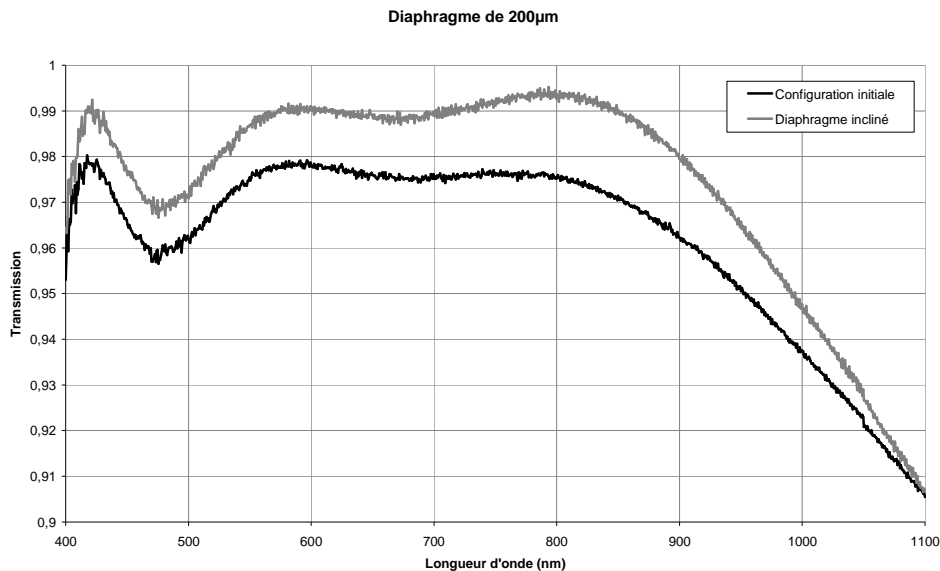


Figure 70 : Mesures du témoin antireflet avec le diaphragme de 200 μ m incliné et non incliné.

Le témoin antireflet est à nouveau mesuré pour différentes tailles de la zone d'analyse avec les diaphragmes inclinés (Figure 71).

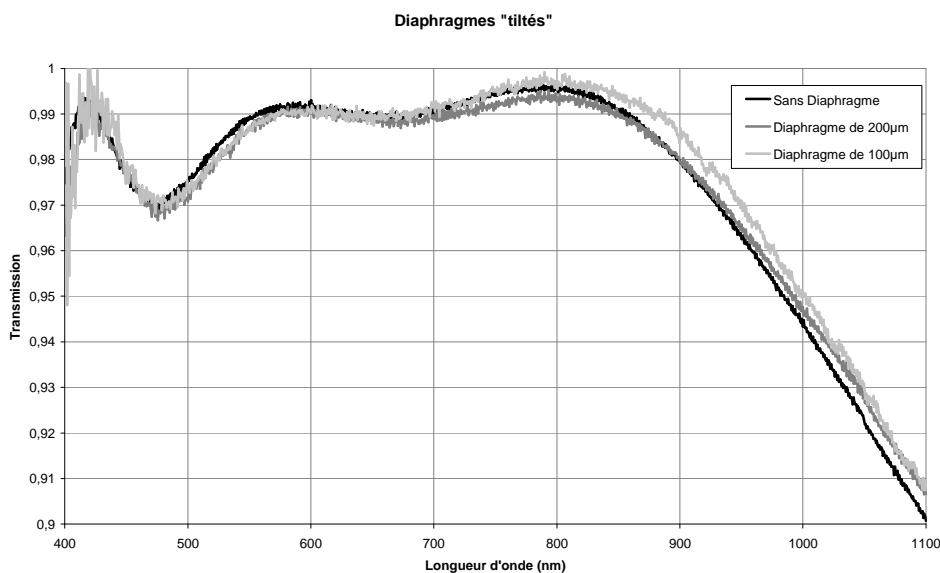


Figure 71 : Mesures du témoin antireflet sans diaphragme et pour les diaphragmes 200 et 100 μ m inclinés.

On constate alors le changement de diamètre de diaphragme n'a plus d'effet sur la valeur mesurée de la transmission de l'antireflet.

IV. Mise en œuvre

IV.1. Substrat de référence

Le principe général de mesure consiste à réaliser l'acquisition du flux transmis par le composant puis à normaliser cette réponse par le flux mesuré sans composant. On s'affranchit ainsi de la réponse d'appareil, de la source jusqu'au détecteur.

Cependant les composants que l'on considère sont constitués d'un substrat à faces planes et parallèles, et leur insertion sur le trajet du faisceau lumineux engendre un déplacement axial de l'image sur la fibre de sortie, et par conséquent une variation du facteur de couplage associé. Le rapport de flux entre une acquisition faite avec et sans composant est donc affecté par cette variation de couplage dans la fibre de sortie. Cet effet est d'autant plus marqué que le faisceau est ouvert. Dans notre cas, il est tel qu'il ne permet pas de calibrer les mesures correctement par rapport à une réponse à vide. Pour avoir un référencement correct, c'est-à-dire un couplage identique dans la fibre de sortie lors des 2 mesures, on propose de référencer les mesures par rapport à un substrat nu de caractéristiques identiques à celles du substrat utilisé pour la fabrication du composant. Ainsi le déplacement axial de l'image lors de l'insertion de ce composant sera compensé par celui dû à l'insertion de la référence.

La transmission du composant en chaque point mesuré est alors définie de la manière suivante :

$$T_{ech} = T_{ref} \frac{\phi_{ech} - \phi_{Noir}}{\phi_{ref} - \phi_{Noir}} \quad (12)$$

Le substrat de référence est supposé non absorbant, d'indice de réfraction connu. Sa transmission théorique est calculée à partir de sa loi de dispersion donnée par l'équation de Sellmeier :

$$n^2(\lambda) - 1 = \frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda^2}{\lambda^2 - C_3} \quad (13)$$

En prenant en compte les réflexions multiples et en faisant l'hypothèse que le substrat est non absorbant, on obtient :

$$T(\lambda) = 1 - \left(\frac{1 - n(\lambda)}{1 + n(\lambda)} \right)^2 \quad (14)$$

$$T_{ref}(\lambda) = \frac{T(\lambda)^2}{1 - (1 - T(\lambda))^2} \quad (15)$$

De plus, le signal d'obscurité ϕ_{Noir} est mesuré et intégré au calcul de la transmission afin de corriger les mesures des effets d'un éventuel décalage de zéro.

En résumé, la mesure s'effectue en 3 temps (Figure 72). Tout d'abord on réalise une acquisition du signal d'obscurité, puis celle du flux de référence et enfin celle des flux transmis par l'échantillon en cours de caractérisation.

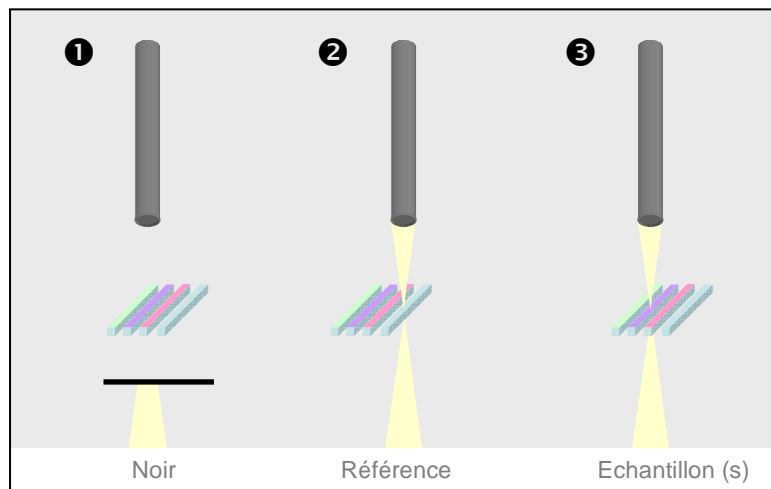


Figure 72 : Principe de mesure

IV.2. Uniformité le long d'une allumette

Ainsi on peut mesurer la transmission des allumettes afin de vérifier si leurs performances spectrales sont conformes aux spécifications de départ. Il peut être également intéressant de vérifier l'uniformité du dépôt sur toute l'allumette. Pour cela on réalise un balayage spatial sur toute la longueur du composant avec un pas de mesure identique à la valeur de la résolution spatiale, permettant ainsi de révéler la présence de défauts ponctuels à la surface du filtre.

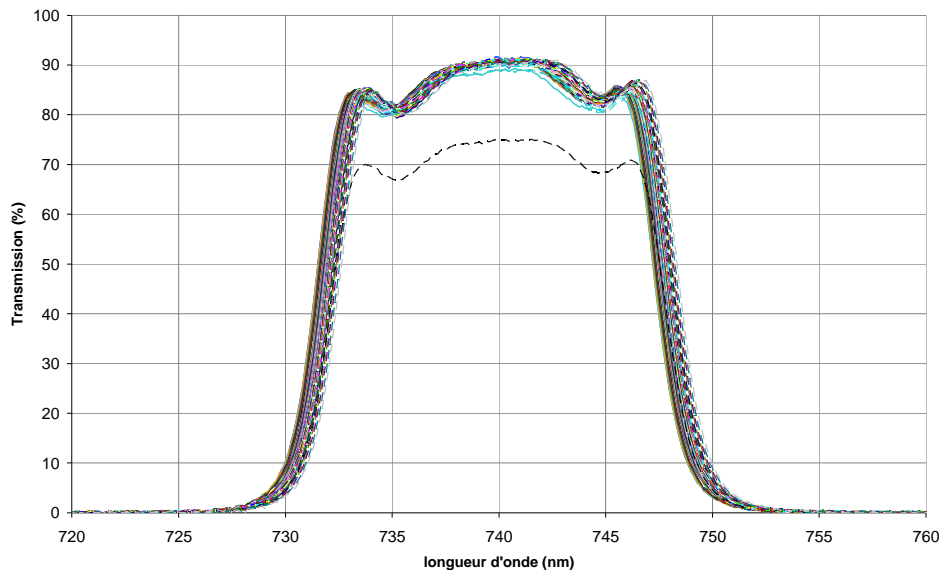


Figure 73 : 101 points de mesure sur 20 mm d'une allumette (Résolution : spatiale \rightarrow 200 μ m – spectrale \rightarrow 1 nm).

Dans l'exemple présenté en Figure 73, on constate que sur les 101 mesures, une seule présente une baisse significative du taux de transmission, probablement due à une poussière ou un défaut de surface.

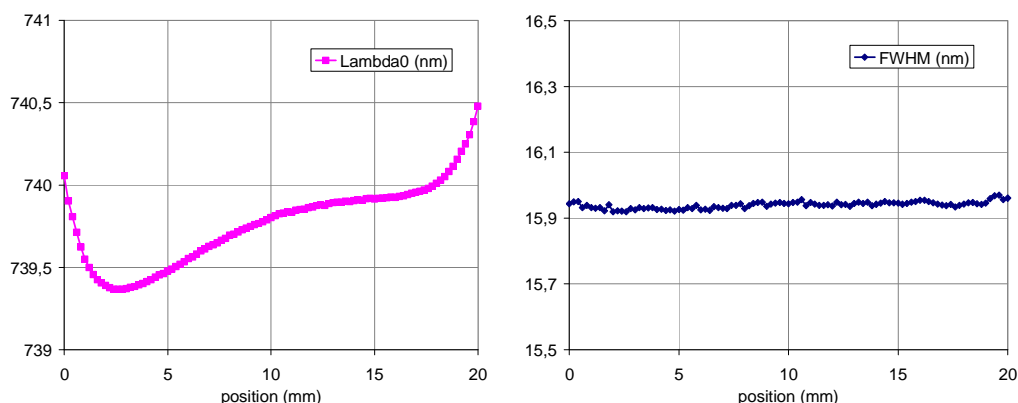


Figure 74 : Evolution de la longueur d'onde de centrage et de la largeur de bande en fonction de la position sur l'allumette.

On peut également extraire de ces courbes l'évolution de la longueur d'onde de centrage, ainsi que celle de la largeur de bande du filtre en fonction de la position sur l'allumette (Figure 74). On remarque que dans l'exemple présenté ici, la largeur de bande du filtre est constante sur toute la longueur du composant, le centrage variant légèrement.

V. Conclusion

Afin de répondre aux besoins de métrologie spécifiques des filtres allumettes, un banc de mesure locale de leur transmission spectrale a été mis en place. Il permet de caractériser spectralement les composants, directement dans les bandes avec une résolution spatiale pouvant atteindre $50 \mu\text{m}$. Les performances de ce montage ont été validées en termes de stabilité, de dynamique et de résolution.

L'automatisation de cet outil de métrologie permet d'une part de réaliser des cartographies de composants allant jusqu'à 6 pouces de diamètre, avec une précision de positionnement de l'ordre du micromètre, et d'autre part de valider la conformité de ces composants avec les spécifications initiales par l'évaluation de leurs principales caractéristiques spectrales immédiatement à l'issue des mesures.

Cependant, l'étude optique du montage révèle un chromatisme important des différents systèmes optiques utilisés, dû notamment à l'ouverture du faisceau à $F/4,5$, mais également au domaine spectral particulièrement étendu puisqu'il va de 400 à 1700 nm. Un problème de lumière parasite, induite par la conjugaison du trou source avec l'échantillon, a également été mis en avant et résolu de manière expérimentale. Il en est de même pour la variation de couplage du flux lumineux transmis dans la fibre de sortie due au déplacement axial de l'image finale engendré par l'insertion de l'échantillon. Le référencement des mesures par rapport à un substrat nu de même épaisseur et de même indice de réfraction que le composant mesuré permet de compenser ce déplacement.

Les performances photométriques obtenues avec la méthodologie de mesure décrite (précision absolue meilleure que 0,5 %, dynamique supérieure à 10^4) sont en tout point conformes aux besoins en caractérisation des filtres allumettes.

Chapitre IV. Réalisation

Les résultats présentés dans ce chapitre concernent ma contribution à la réalisation d'un composant prototype destiné à valider la faisabilité d'un filtre allumette par technologie d'assemblage. Les spécifications utilisées sont celles du projet de pré-développement GMES-Sentinel-2 de l'ESA.

Le programme GMES (Global Monitoring for Environment and Security), renommé Kopernikus en septembre 2008, est une initiative conjointe de l'ESA et de l'Union européenne, visant à fédérer et rationaliser les activités européennes d'observation de la Terre, l'objectif principal de ce programme étant de donner à l'Europe une autonomie pour la surveillance à différentes échelles (locale, régionale, globale). Il permettra à l'Europe de disposer d'un système d'information fiable et précis, contribuant à la politique commune en matière de sécurité et de défense. Les thèmes jugés prioritaires sont la gestion de l'océan et des zones côtières, l'occupation des sols et le suivi des ressources végétales, les risques naturels et industriels, mais également la gestion de l'eau, la qualité de l'atmosphère et la sécurité des personnes et des biens. Le segment spatial dédié du programme GMES sera couvert par la constellation Sentinel, divisée en cinq sous-groupes pour assurer une couverture étendue et multiforme utilisant toutes les technologies d'observation. Dans ce programme, Sentinel-2 s'inscrit comme la composante optique, constituée de deux satellites, le lancement du premier étant programmé en 2012. Conçu comme successeur aux actuels satellites Spot et Landsat pour assurer la continuité de l'observation optique de la Terre depuis l'espace, Sentinel-2 a pour objectif d'imager les zones émergées en mode multispectral et avec une haute résolution spatiale. L'instrument multispectral se compose d'un télescope de type TMA et d'une dichroïque séparant le faisceau incident sur deux plans focaux, VNIR et SWIR. La séparation spectrale s'effectue alors dans chacun de ces plans par des composants de type filtre allumette, avec dix bandes spectrales dans le domaine VNIR, et trois bandes spectrales dans le domaine SWIR.

Dans ce chapitre, on s'intéressera notamment à la démarche menée, à partir des spécifications de départ, pour aboutir à la réalisation de deux composants par technologie d'assemblage.

I. Architecture de composant

I.1. Structure proposée

Comme il a été vu précédemment, l'architecture du composant est directement liée au choix du type d'assemblage des allumettes, selon que celui-ci est structural ou optique. Dans le cas d'assemblage optique, on distingue les assemblages optiques opaques, dans lesquels les allumettes sont assemblées par la tranche, et les assemblages optiques transparents, les allumettes étant alors assemblées par les faces portant la fonction de filtrage optique.

L'intérêt principal d'une configuration d'assemblage optique opaque réside dans la suppression de tout flux parasite passant entre les allumettes. Ceci permet alors d'envisager les dépôts des masques absorbants avant et arrière directement sur les allumettes elles-mêmes. Toutefois, dans une telle configuration les allumettes étant jointives, l'effet cumulatif des erreurs dimensionnelles de chacune d'entre elles devient alors d'autant plus important que le nombre d'allumettes est grand, engendrant de ce fait un risque de désalignement vis-à-vis des lignes du détecteur.

Une solution pour s'affranchir de ces contraintes dimensionnelles sur les substrats consiste à positionner les allumettes de façon non jointive. La conséquence principale, outre l'abandon des architectures basées sur un assemblage optique opaque, est que la réalisation des fonctions absorbeur d'entrée et de sortie ne peut plus être envisagée directement sur les allumettes, compte tenu de l'espace libre existant entre elles. Par conséquent, celles-ci devront donc être réalisées sur deux fenêtres indépendantes de part et d'autre du composant. L'alignement et l'espacement des filtres par rapport aux lignes du détecteur sont alors entièrement définis par la géométrie de ces fenêtres, ce qui relâche dès lors très fortement les contraintes d'alignement des substrats allumettes. La solution retenue pour ces masques consiste en un traitement absorbant interférentiel, structuré par des techniques de lift-off ou de gravure, nous permettant ainsi de maîtriser au mieux les propriétés optiques et géométriques, tout en assurant une bonne stabilité mécanique de l'ensemble. En effet, il serait également possible d'envisager l'utilisation de masques métalliques, mais la rigidité de telles pièces risque d'être insuffisante pour garantir les performances requises.

De plus, nous nous sommes orientés vers une configuration à deux interfaces, c'est-à-dire une seule allumette par voie, cela nous paraissant être le meilleur compromis entre les difficultés liées aux étapes de dépôts et à l'assemblage des allumettes entre elles. L'agencement des différents éléments optiques du composant est représenté schématiquement sur la Figure 75.

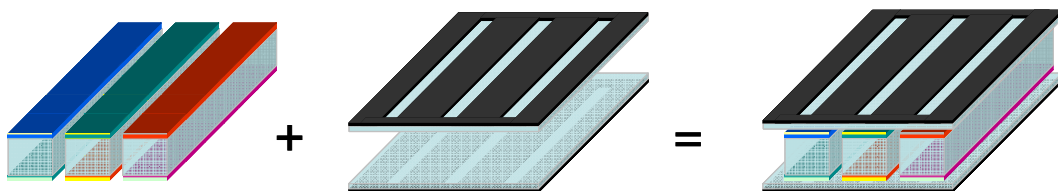


Figure 75 : Schéma de principe de l'architecture du composant.

Une telle architecture permet de se placer dans une configuration d'assemblage optique transparent, en venant assembler les allumettes directement sur les fenêtres. Des technologies de type adhérence moléculaire peuvent être envisagées puisqu'il s'agit dans ce cas d'assembler des substrats optiques entre eux. Cependant, l'assemblage par adhérence des allumettes sur les deux fenêtres demanderait une stricte égalité des épaisseurs des différentes allumettes, traitements compris, ce qui n'est guère compatible avec les tolérances de

réalisation. De ce fait, il est envisageable de ne réaliser qu'un seul lien par adhérence et il est alors nécessaire d'utiliser un adhésif, qui permettra de compenser les variations d'épaisseurs entre les substrats.

Cependant, dans une telle configuration, il ne sera pas possible de minimiser la différence de chemin optique entre les voies, puisque qu'une diminution de l'épaisseur de l'allumette conduit directement à une augmentation de l'épaisseur de colle dont l'indice est généralement proche de celui du verre. Pour atteindre la spécification bornant la différence de chemin optique entre les voies d'un même plan focal, il faudrait que le milieu extérieur soit d'indice différent, de l'air par exemple. En effet, dans ce cas, il devient alors possible de compenser les différences de chemin optique en adaptant les épaisseurs des allumettes pour chacune des voies.

L'assemblage optique transparent n'est donc pas compatible avec la minimisation de différence de chemin optique entre les voies, ce qui nous conduit à utiliser un assemblage structural. Dans ce cas, les éléments optiques sont collés sur une structure qui assure leur maintien mécanique, et dont la définition permet l'alignement précis des allumettes par rapport aux lignes de détection. Les fenêtres quant à elles viennent se placer de part et d'autre de la structure (Figure 76).

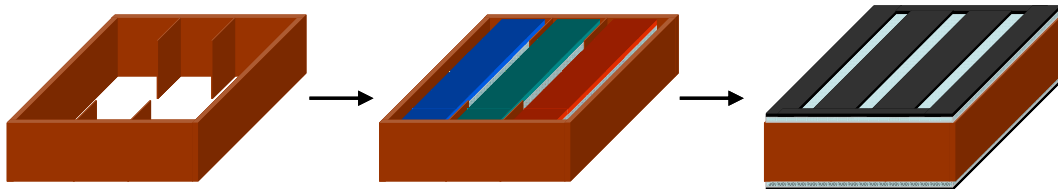


Figure 76 : Assemblage des éléments optiques dans la structure mécanique.

L'assemblage du composant s'effectue alors en deux étapes : les allumettes sont tout d'abord collées par leurs extrémités dans le cadre, puis on colle les fenêtres, sur deux de leurs côtés seulement pour permettre d'une part à l'air qui se situe dans la structure de s'échapper lors de la mise sous vide, et d'autre part pour minimiser les contraintes lors de sollicitations thermiques.

I.2. Validation de l'architecture choisie

La validation de l'architecture décrite précédemment a été réalisée par la mise en œuvre d'un composant de test représentatif du point de vue mécanique uniquement, comportant des allumettes non traitées. L'objectif de cette maquette était de qualifier notre procédure d'assemblage, ainsi que le choix de l'adhésif utilisé.

Tout d'abord, il convient de définir la structure mécanique soutenant l'ensemble des éléments optiques. Celle-ci doit être réalisée dans un matériau de coefficient de dilatation thermique proche de celui des allumettes pour éviter tout désalignement lorsque le composant est soumis à des contraintes thermiques. Le matériau choisi doit également être usinable, et ce de manière précise, puisqu'il définit le positionnement des allumettes. On choisira alors un cadre en titane, pour son faible CTE (Coefficient of Thermal Expansion), de l'ordre de $8,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, qui se rapproche au mieux pour un métal de celui des allumettes, compris entre 4 et $9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ selon la nature du substrat, transparent ou coloré. Ce matériau offre en outre l'avantage de pouvoir être usiné de manière précise notamment par électroérosion. Les dimensions du cadre sont fixées d'une part par les dimensions des allumettes et leur espacement, et d'autre part par l'interfaçage avec le détecteur. De plus, afin de minimiser les éventuelles réflexions parasites, la structure mécanique sera anodisée.

Pour les substrats portant les fonctions de filtrage optique, on choisit de ne pas intégrer d'étape de découpe dans notre procédé de fabrication afin de limiter les risques associés. Les substrats

choisis possèdent donc la géométrie finale des allumettes, leurs épaisseurs étant identiques. En effet, on ne cherchera pas à minimiser la différence de chemin optique entre les voies, celle-ci étant estimée, avec les empilements théoriques que nous présenterons un peu plus loin dans ce chapitre, comme étant inférieure à une vingtaine de microns pour les composants VNIR et SWIR, et provenant essentiellement de l'utilisation de verre coloré.

Les fenêtres portant les traitements absorbeurs étant communes à toutes les bandes de chaque composant VNIR et SWIR, elles doivent donc être transparentes pour chacun des domaines spectraux correspondants. Géométriquement, ces fenêtres sont choisies de dimensions légèrement inférieures aux dimensions extérieures du composant. Concernant l'épaisseur, l'architecture du composant ainsi que la limitation en terme d'épaisseur totale nous impose des fenêtres relativement fines, typiquement quelques centaines de microns.

Dans un premier temps, ces allumettes sont collées à la structure mécanique par leurs extrémités, le positionnement étant réalisé grâce à des plots intégrés dans le cadre. Dans une seconde étape, ces fenêtres sont collées sur le cadre, finissant ainsi la réalisation des composants tests (Figure 77). Les composants ainsi réalisés sont ensuite soumis à différents tests afin de valider la tenue mécanique de l'architecture proposée.

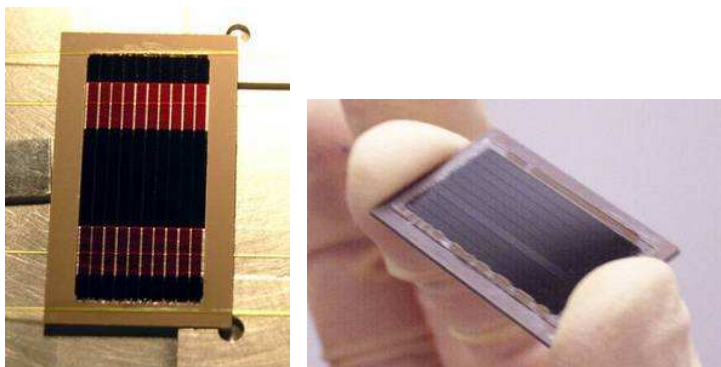


Figure 77 : Photographies de la maquette VNIR avant le collage des fenêtres (à gauche) et après (à droite).

Tout d'abord, les composants sont soumis à un cyclage thermique de 4 cycles entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, à pression atmosphérique, avec des rampes de $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ et des paliers de 2 h, puis à un second cyclage thermique de 5 cycles entre $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, avec des rampes de $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ et des paliers de 2 h, mais sous vide cette fois. Enfin, un test de tenue aux vibrations a été réalisé, suivant les 3 axes des composants, en appliquant les niveaux de sollicitations présentés dans le Tableau 7.

Sinus :	26 Hz – 100 Hz	25g
Random :	10 Hz – 100 Hz	+3dB/oct
	100 Hz – 700 Hz	0,5 g ² /Hz
	700 Hz – 2000 Hz	-3dB/oct
	total	30g RMS

Tableau 7 : Paramètres du test de tenue en vibrations.

Une inspection visuelle au microscope optique a été réalisée avant et après chacun de ces tests, et nous a permis de valider la tenue des composants à l'ensemble de ces sollicitations. En effet, aucune dégradation n'a été constatée.

Ainsi l'architecture de composant que l'on propose est validée mécaniquement et va donc être mise en œuvre pour la réalisation de composants filtres allumettes prototypes également représentatifs du point de vue optique.

I.3. Principales étapes de fabrication

Le procédé de fabrication que l'on va mettre en œuvre pour la réalisation des composants comprend donc d'une part la réalisation des allumettes portant les fonctions de filtrage optique, et d'autre part la réalisation des fenêtres portant les masques absorbants. Tous ces éléments sont réalisés en parallèle, puis assemblés par collage structural sur une structure mécanique (Figure 78).

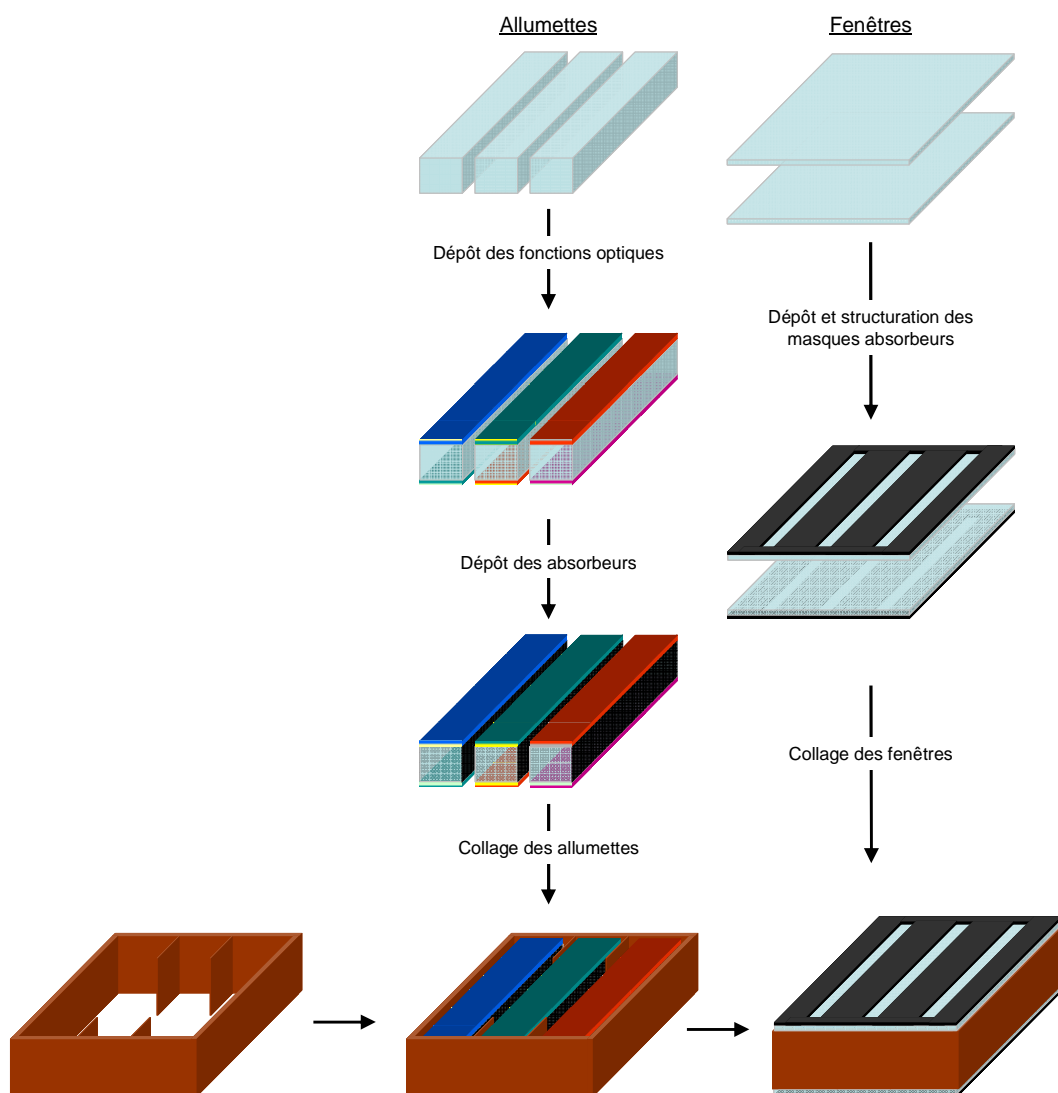


Figure 78 : Principe de réalisation des composants.

II. Réalisation des allumettes

II.1. Spécifications spectrales

II.1.1. Performances à atteindre

Les fonctions de filtrage spectral doivent répondre à des spécifications en termes de centrage et de largeur spectrale, mais également d'oscillations dans la bande et de taux de réjection.

Le taux de réjection correspond au rapport entre l'énergie intégrée dans la bande passante et l'énergie intégrée sur la totalité du domaine spectral. Il est spécifié à deux niveaux, 5 % et 1 %, correspondant à des bornes d'intégrations différentes au voisinage de la bande passante. Le taux de réjection à 1 %, plus exigeant, est très lié à la raideur des flancs de la bande passante. Ces taux se calculent à partir de la réponse spectrale complète du filtre, c'est à dire en prenant en compte la sensibilité du détecteur $QE(\lambda)$, la réponse spectrale complète du télescope $DM(\lambda)$, ainsi que la luminance de la Terre. Ils peuvent se formuler de la manière suivante :

$$Réj_{5\%} = 1 - \frac{\int_{\lambda_{\min 5\%}}^{\lambda_{\max 5\%}} L(\lambda)T(\lambda)QE(\lambda)DM(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L(\lambda)T(\lambda)QE(\lambda)DM(\lambda)d\lambda} < 5\% \quad (16)$$

$$Réj_{1\%} = 1 - \frac{\int_{\lambda_{\min 1\%}}^{\lambda_{\max 1\%}} L(\lambda)T(\lambda)QE(\lambda)DM(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L(\lambda)T(\lambda)QE(\lambda)DM(\lambda)d\lambda} < 1\% \quad (17)$$

Les longueurs d'onde à 5 %, respectivement 1 %, sont spécifiées pour chacune des bandes.

En termes d'oscillation dans la bande, on se placera entre les longueurs d'onde pour lesquelles la valeur de transmission est égale à 80 % de la transmission maximale, les plus proches des longueurs d'onde à mi-hauteur. Dans ce domaine, la réponse spectrale complète du filtre devra toujours être supérieure à 75 %.

$$\forall \lambda \in [\lambda_{\min 80\%} ; \lambda_{\max 80\%}], T(\lambda)DM(\lambda)QE(\lambda)L(\lambda) > 0,75 \quad (18)$$

Afin de déterminer la réponse spectrale complète du filtre, on utilise le profil spectral normé de la luminance de la Terre présenté sur la Figure 79. On constate que ce profil varie fortement suivant la longueur d'onde. Ceci implique notamment des niveaux de transmission à atteindre dans les bandes de réjections différents selon les voies spectrales.

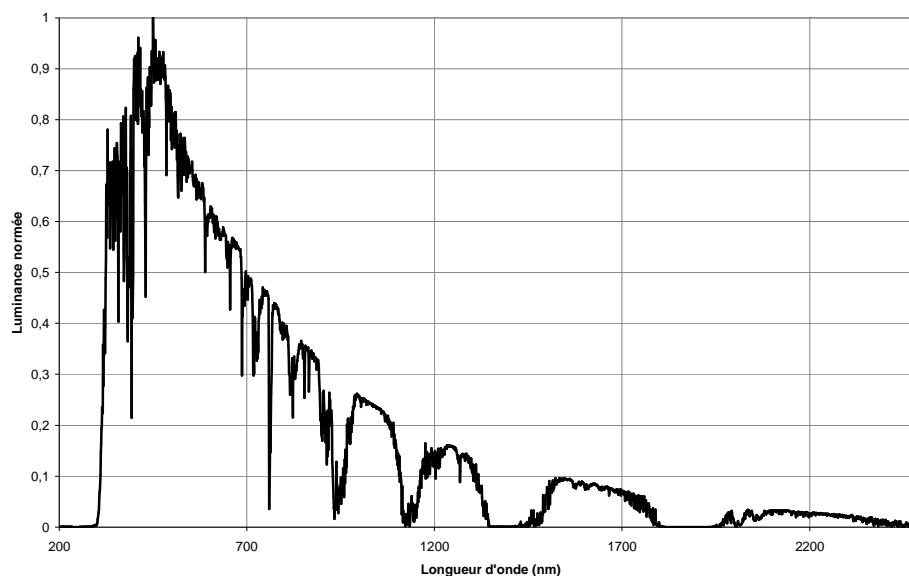


Figure 79 : Profil spectral normé de la luminance.

L'ensemble des formules apparaissant dans ces spécifications spectrales a été introduit dans un programme informatique qui permet de calculer les valeurs prises par ces paramètres spectraux à partir des profils théoriques.

L'ensemble des calculs théoriques présentés par la suite a été réalisé en incidence normale et faisceau ouvert, de demi-angle $8,15^\circ$.

II.1.2. Choix des bandes spectrales

Les caractéristiques spectrales des 13 bandes Sentinel-2 sont résumées dans le Tableau 8. Parmi ces bandes, nous avons choisi d'en réaliser deux dans chacun des domaines spectraux VNIR et SWIR, représentatives en termes de position dans le domaine spectral, ainsi que de largeur de bande.

Bande	Centrage (nm)	Largeur de bande (nm)
1	443	20
2	490	65
3	560	35
4	665	30
5	705	15
6	740	15
7	775	20
8	842	115
8a	865	20
9	940	20
10	1375	20
11	1610	90
12	2190	180

Tableau 8 : Bandes spectrales Sentinel-2

Dans le domaine VNIR, la première bande que nous avons choisie de réaliser est la bande B2, qui se situe à une extrémité du domaine spectral et présente une largeur spectrale relativement

importante : cette bande est centrée sur la longueur d'onde de 490 nm, avec une largeur de 65 nm. Elle est notamment utilisée pour sa sensibilité à certains aspects de la végétation, comme les caroténoïdes, pigments répandus chez de très nombreux organismes vivants. La seconde bande réalisée sera la bande B6, qui se situe quant à elle au centre du domaine spectral et présente une largeur spectrale relativement étroite : sa longueur d'onde de centrage est de 740 nm, pour une largeur de 15 nm. Pour cette mission, cette bande est choisie car elle peut notamment permettre une correction atmosphérique du fait de sa sensibilité aux aérosols.

Dans le domaine SWIR, la première bande à laquelle nous nous intéresserons est la bande B10, de largeur spectrale relativement étroite : 20 nm. Cette bande, centrée sur la longueur d'onde de 1375 nm, se situe juste au niveau d'une importante bande d'absorption de vapeur d'eau. Elle permet ainsi une correction atmosphérique par la détection de nuages fins de type cirrus. La seconde bande SWIR, B11, est quant à elle de largeur spectrale plus importante, à savoir 90 nm, pour une longueur d'onde de centrage de 1610 nm. Elle est utilisée dans différentes missions pour sa sensibilité à certains aspects de la végétation, mais surtout parce qu'elle participe à la distinction entre les nuages, la neige, et la glace.

	λ_0	Stabilité	$\Delta\lambda_{FWHM}$	Stabilité	$\lambda_{\min 5\%}$	$\lambda_{\max 5\%}$	$\lambda_{\min 1\%}$	$\lambda_{\max 1\%}$
	(nm)	(\pm nm)	(nm)	(\pm nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)
B2	490	5,0	65	2,5	430,1	549,9	425,1	554,9
B6	740	3,0	15	1,5	725,0	758,0	720,0	760,0
B10	1375	10,0	20	10,0	1342,8	1407,5	1337,6	1412,5
B11	1610	10,0	90	10,0	1546,0	1685,0	1532,0	1704,0

Tableau 9 : Spécifications spectrales des voies de notre étude.

Les stabilités en termes de centrage et de largeur de bandes sont présentées dans le Tableau 9, ainsi que les longueurs d'onde nécessaires au calcul de la réjection, résumant ainsi les différents paramètres spectraux de chacune des voies qui vont être réalisées.

II.2. Etude théorique des empilements

Les performances spectrales à atteindre pour chacune des voies reprennent les définitions présentées précédemment, dont les formules ont été programmées pour permettre une extraction directe des paramètres spectraux à la fois à partir des profils théoriques calculés et à l'issue des mesures spectrales.

L'architecture de composant choisie nous place dans une configuration à deux interfaces, le milieu extérieur considéré étant de l'air. On choisit pour la réalisation de ces empilements la technologie DIBS (Dual Ion Beam Sputtering) car elle permet d'obtenir des couches denses et compatibles avec l'environnement spatial ; les matériaux utilisés sont des oxydes.

II.2.1. Voies VNIR

- Bande B2

Tout d'abord, il convient de déterminer la nature du substrat, ainsi que les empilements à déposer sur chacune de ses deux faces. Pour la voie B2, nous avons choisi d'utiliser un substrat transparent, et de combiner les fonctions passe-bande et passe-haut en un empilement, le second se limitant alors à la fonction passe-bas (Figure 80).

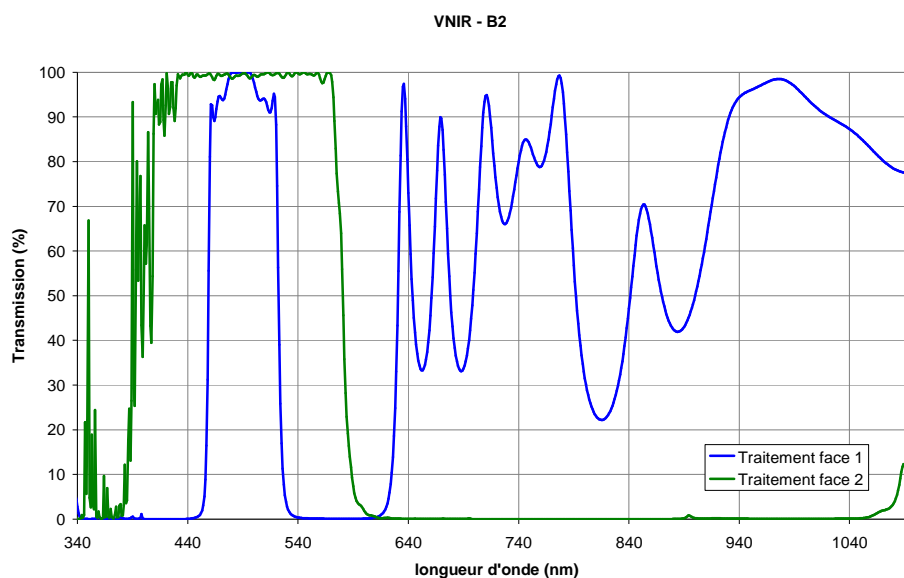


Figure 80 : Calcul de la voie B2 en 2 interfaces sur substrat transparent.

La transmission spectrale de l'allumette, compte tenu des réflexions multiples, ainsi que la réponse complète pour cette voie, sont données sur le Figure 81.

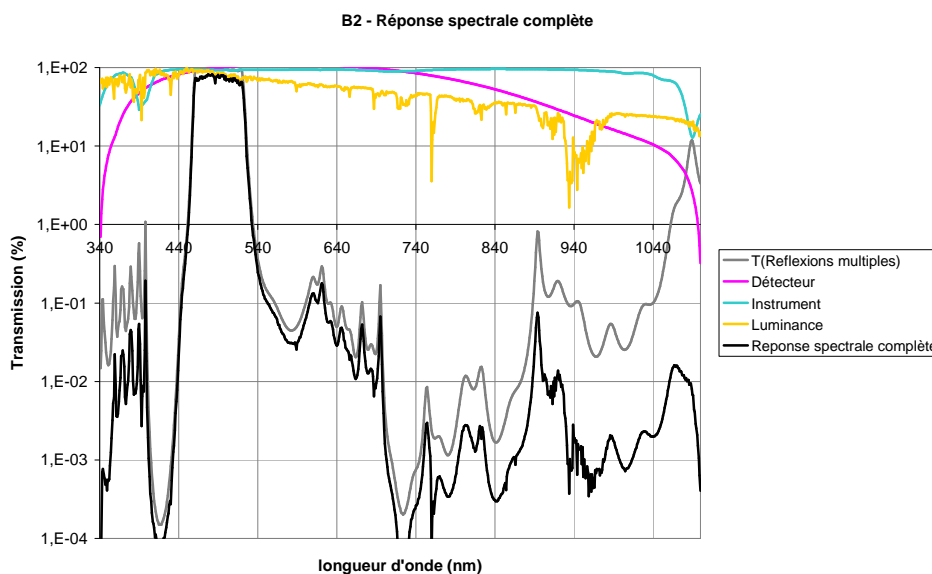


Figure 81 : Réponse spectrale complète de la voie B2.

On remarquera que cette voie B2, centrée à 490 nm, est favorisée par sa position dans le domaine spectral puisqu'elle se situe au maximum de luminance de la source, et de sensibilité du détecteur. Autrement dit, cela réduit le signal détecté dans les bandes de réjection, ce qui permet de réduire le nombre de couches des fonctions de blocage, en particulier la fonction passe bas. La largeur de bande, relativement élevée, contribue également à ce phénomène.

Les performances spectrales de cette voie sont résumées dans le Tableau 10.

B2	<i>Specification</i>	<i>Théorique</i>
Oscillations	-	OK
λ_0	490 (± 5)	490,6
FWHM	65 ($\pm 2,5$)	63,6
Trej à 1%	<1%	0,20%
Trej à 5%	<5%	0,21%

Tableau 10 : Performances spectrales théoriques de la voie B2.

- Bande B6

Pour cette voie, centrée à 740 nm, on choisit d'utiliser comme substrat un verre coloré. Celui nous paraissant le mieux adapté dans ce cas est le RG695 de Schott. La détermination des empilements est alors réalisée à partir d'une mesure d'un substrat de RG695. Ainsi, on se rapproche au maximum des conditions réelles, et l'on peut déterminer les empilements de blocage en tenant compte de la transmission réelle du substrat.

De la même manière que précédemment on détermine les formules des deux empilements, en choisissant de séparer la fonction élémentaire de blocage passe-bas. On considère alors sur la face 1 du substrat le filtre Fabry-Perot multicavité bloqué dans les courtes longueurs d'onde, et sur la face 2 le blocage passe-bas (Figure 82).

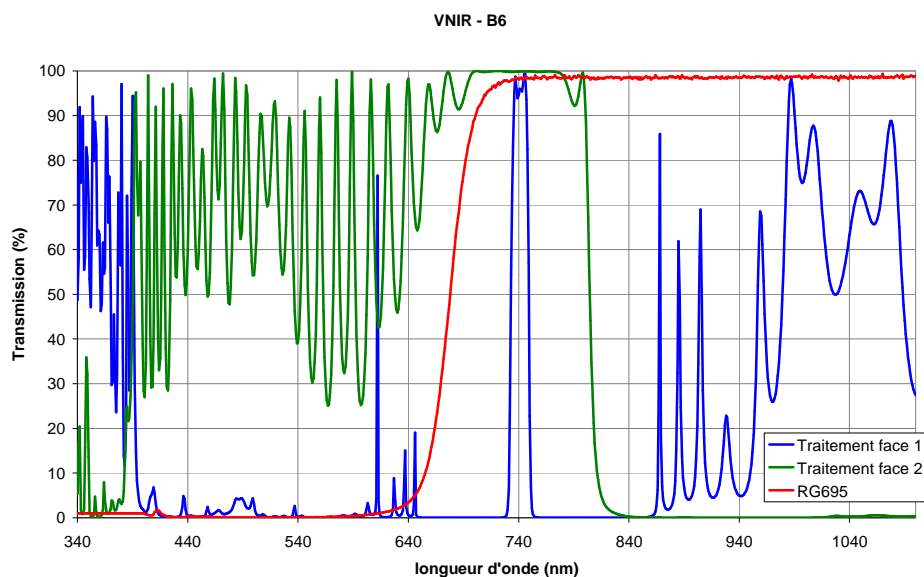


Figure 82 : Calcul de la voie B6 en 2 interfaces sur substrat absorbant de RG695.

Comme précédemment, on donne Figure 83 la transmission de l'allumette ainsi que la réponse spectrale complète pour cette voie.

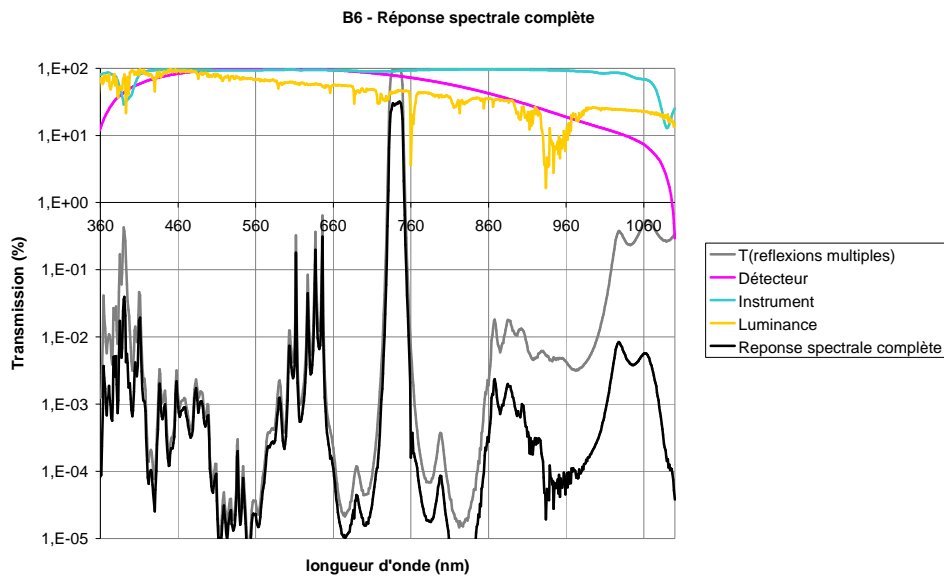


Figure 83 : Réponse spectrale complète de la voie B2.

Les performances spectrales de l'ensemble, toutes conformes aux spécifications de départ, sont présentées dans le Tableau 11.

B6	<i>Spécification</i>	<i>Théorique</i>
Oscillations	-	OK
λ_0	740 (± 3)	741,0
FWHM	15 ($\pm 1,5$)	16,4
Trej à 1%	<1%	0,39%
Trej à 5%	<5%	0,39%

Tableau 11 : Performances spectrales théoriques de la voie B6.

Le nombre de couches total nécessaire pour atteindre ces performances spectrales est du même ordre de grandeur que dans le cas de la voie B2. L'utilisation d'un verre coloré permet de compenser le fait que la voie B6 est d'une part de largeur spectrale plus faible, mais également moins favorablement située dans le domaine spectral.

- Autres bandes

Le calcul des empilements a été réalisé pour l'ensemble des voies VNIR de la même manière que précédemment. Les profils théoriques ainsi déterminés sont présentés sur la Figure 84. Les niveaux de transmission dans les bandes de réjection des filtres dépendent principalement de la position de la bande passante dans le domaine spectral, et se situent typiquement entre 10^{-3} et 10^{-4} .

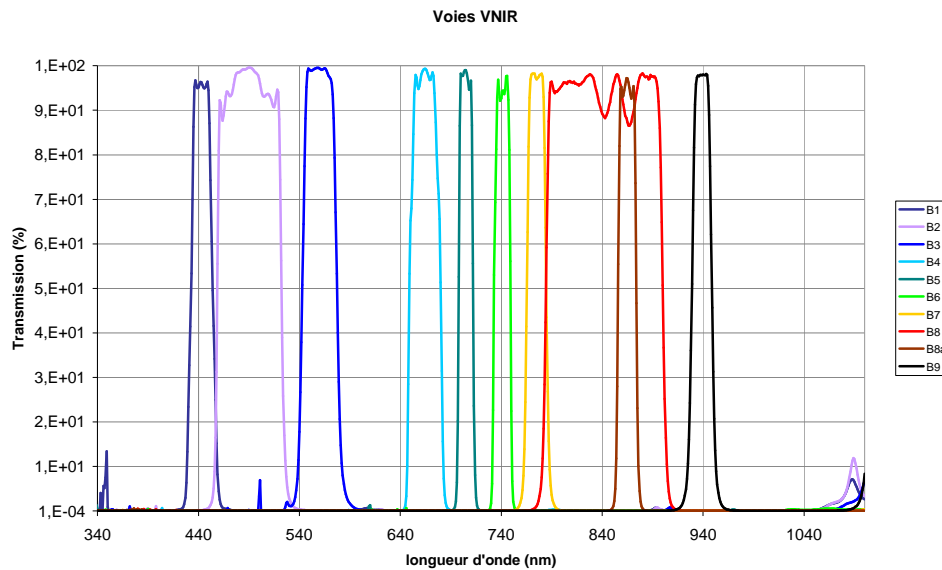


Figure 84 : Profil théorique des voies VNIR.

Les substrats choisis sont des substrats transparents pour les premières voies, à savoir B1 et B3. Pour les autres voies, on choisit des verres colorés, RG610 pour les voies B4 et B5, et RG695 pour les voies B7, B8, B8a et B9. D'autres verres colorés, avec des longueurs d'onde de coupure plus élevée aurait également pu être choisis, cependant il est préférable de minimiser le nombre de verres colorés différents pour des questions d'égalité de chemin optique et de qualification en environnement spatial des substrats.

De plus, on notera l'exception de la voie B8, qui, du fait de son importante largeur spectrale : 115 nm, est construit comme l'association de deux fonctions dichroïques passe-bas et passe-haut (Figure 85).

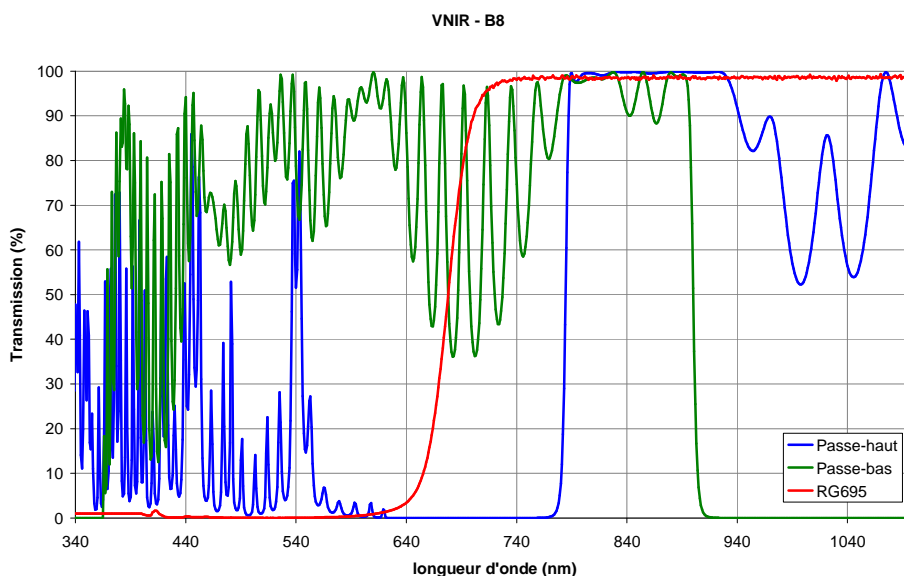


Figure 85 : Calcul de la voie B8 en 2 interfaces par association d'une fonction passe-bas avec une fonction passe-haut sur substrat absorbant de RG695.

Les empilements ont été déterminés de manière à obtenir pour toutes les voies des performances optiques conformes aux spécifications. Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 12.

		λ_0 (nm)	FWHM (nm)	Trej à 1%	Trej à 5%	Oscillations
B1	Specification	443 (± 3)	20 (± 2)	<1%	<5%	-
	Théorique	443,4	21,6	0,87%	0,99%	OK
B2	Specification	490 (± 5)	65 ($\pm 2,5$)	<1%	<5%	-
	Théorique	490,6	63,6	0,20%	0,21%	OK
B3	Specification	560 (± 5)	35 (± 2)	<1%	<5%	-
	Théorique	560,1	34,3	0,59%	0,61%	OK
B4	Specification	665 (± 3)	30 ($\pm 1,5$)	<1%	<5%	-
	Théorique	664,5	31,2	0,24%	0,25%	OK
B5	Specification	705 (± 3)	15 ($\pm 1,5$)	<1%	<5%	-
	Théorique	705	14,3	0,45%	0,49%	OK
B6	Specification	740 (± 3)	15 ($\pm 1,5$)	<1%	<5%	-
	Théorique	741	16,4	0,39%	0,39%	OK
B7	Specification	775 (± 5)	20 (± 2)	<1%	<5%	-
	Théorique	775	19,4	0,14%	0,15%	OK
B8	Specification	842 (± 5)	115 (± 2)	<1%	<5%	-
	Théorique	842,3	115,7	0,15%	0,16%	OK
B8a	Specification	865 (± 5)	20 (± 2)	<1%	<5%	-
	Théorique	864,8	18,2	0,79%	0,79%	OK
B9	Specification	940 (± 5)	20 (± 2)	<1%	<5%	-
	Théorique	938,8	19,9	0,61%	0,67%	OK

Tableau 12 : Performances spectrales des voies VNIR.

II.2.2. Voies SWIR

Pour l'ensemble des voies réparties sur le domaine spectral SWIR, nous avons choisis d'utiliser des substrats transparents.

- Bande B10

Comme il a été dit précédemment, la voie B10 se situe au niveau d'une importante bande d'absorption de vapeur d'eau, ce qui se traduit par un niveau de luminance particulièrement faible. Il faudrait alors un nombre de couches très important pour atteindre les spécifications de réjection demandées. Les solutions à mettre en œuvre n'étant pas réalisables, il a donc été choisi d'utiliser pour cette voie un profil de luminance légèrement différent, ainsi qu'un domaine spectral réduit allant de 1100 nm à 2100 nm.

On détermine alors les empilements permettant de réaliser la fonction de filtrage B10. On notera cependant que pour cette voie le filtre passe bande se retrouve seul sur une face, alors que les blocages passe haut et passe bas sont associés en même empilement sur l'autre face (Figure 86).

La transmission de l'ensemble, ainsi que la réponse spectrale complète de la voie B10 sont présentées sur la Figure 87.

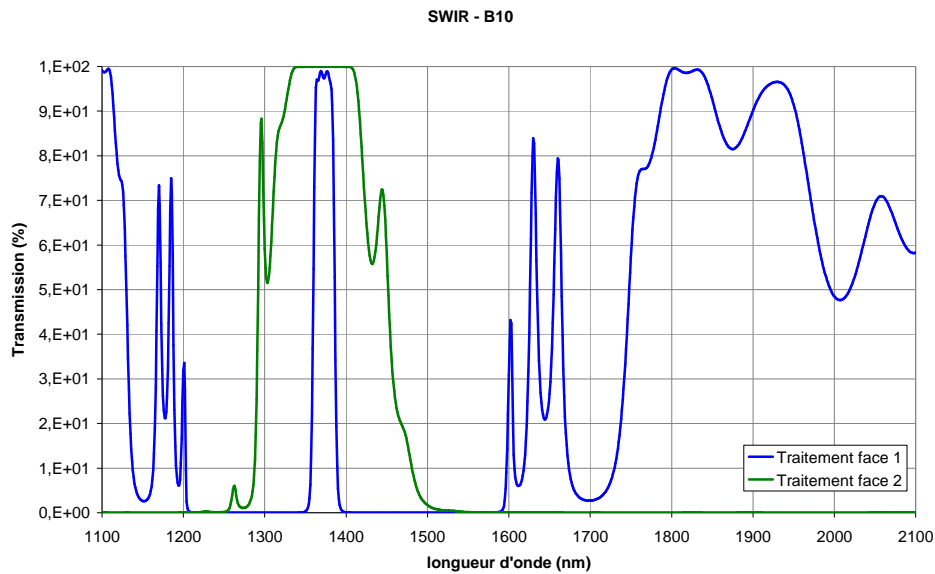


Figure 86 : Calcul de la voie B10 en 2 interfaces sur substrat transparent.

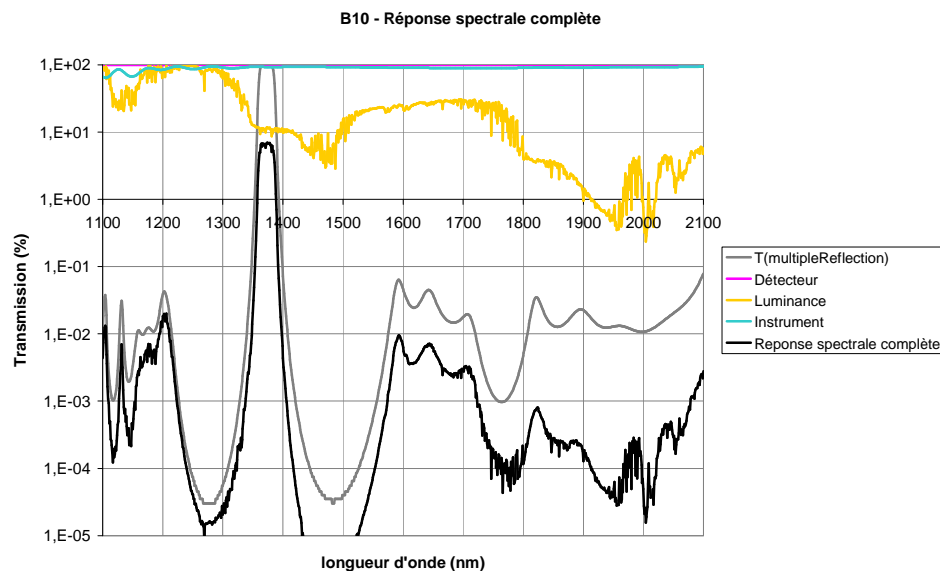


Figure 87 : Réponse spectrale complète de la voie B10.

On estime alors les performances spectrales de l'ensemble qui sont résumées dans le Tableau 13, les empilements étant définis pour qu'elles soient toutes conformes aux spécifications initiales.

B10	Spécification	Théorique
Oscillations	-	OK
λ_0	1375 (± 10)	1372,9
FWHM	20 (± 10)	26,5
Trej à 1%	<1%	0,78%*
Trej à 5%	<5%	0,79%*

* valeurs estimées sur le domaine spectral [1100; 2100nm]

Tableau 13 : Performances spectrales théoriques de la voie B10.

- Bande B11

De même que pour les voies précédentes, on détermine, pour la bande B11, les formules des deux empilements à réaliser. On notera que comme précédemment les deux blocages sont associés en un seul empilement, le filtre passe-bande est alors seul sur l'autre face (Figure 88).

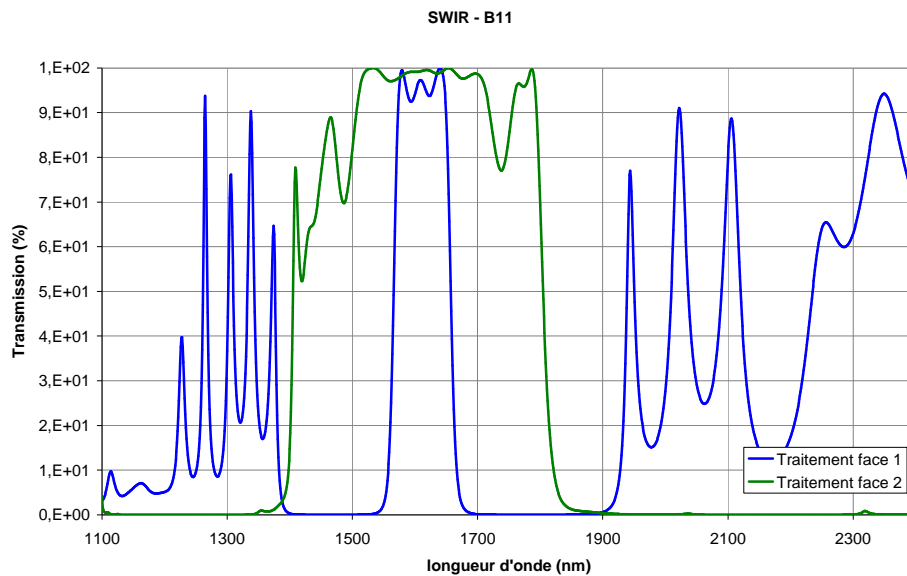


Figure 88 : Calcul de la voie B11 en 2 interfaces sur substrat transparent.

La transmission ainsi que la réponse spectrale complète de la voie B11 sont présentées sur la Figure 89.

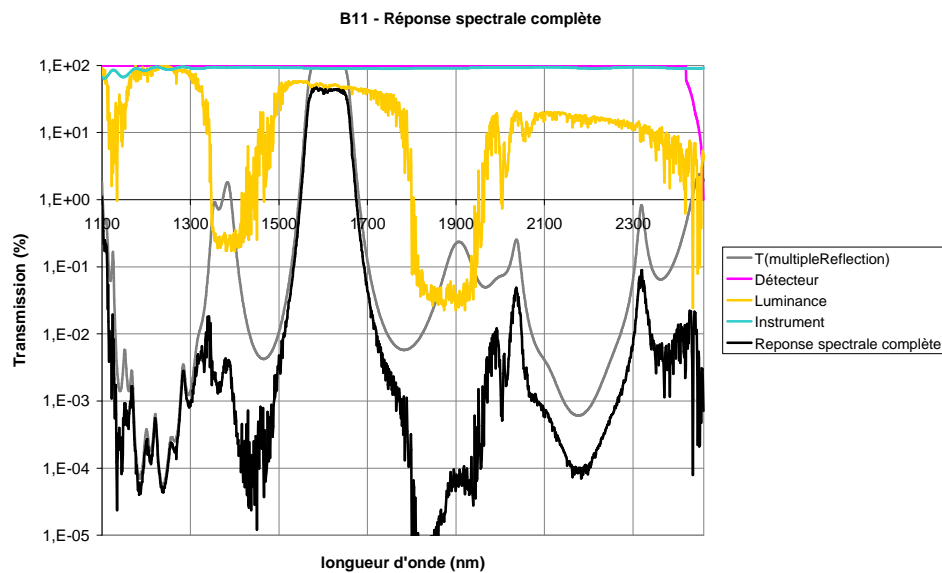


Figure 89 : Estimation de la réponse spectrale complète de la voie B11.

Les performances spectrales évaluées à partir de ces empilements théoriques sont résumées dans le Tableau 14.

B11	<i>Specification</i>	<i>Théorique</i>
Oscillations	-	OK
λ_0	1610 (± 10)	1611,8
FWHM	90 (± 10)	91,3
Trej à 1%	<1%	0,23%
Trej à 5%	<5%	0,36%

Tableau 14 : Performances spectrales théoriques de la voie B11.

- Bande B12

Bien que non réalisée, la voie B12 a également été calculée en deux interfaces sur un substrat transparent. La bande passante étant située à l'extrémité du domaine spectral de détection, il n'y a pas besoin de blocage passe bas pour cette voie. Le profil spectral ainsi obtenu est présenté sur la Figure 90.

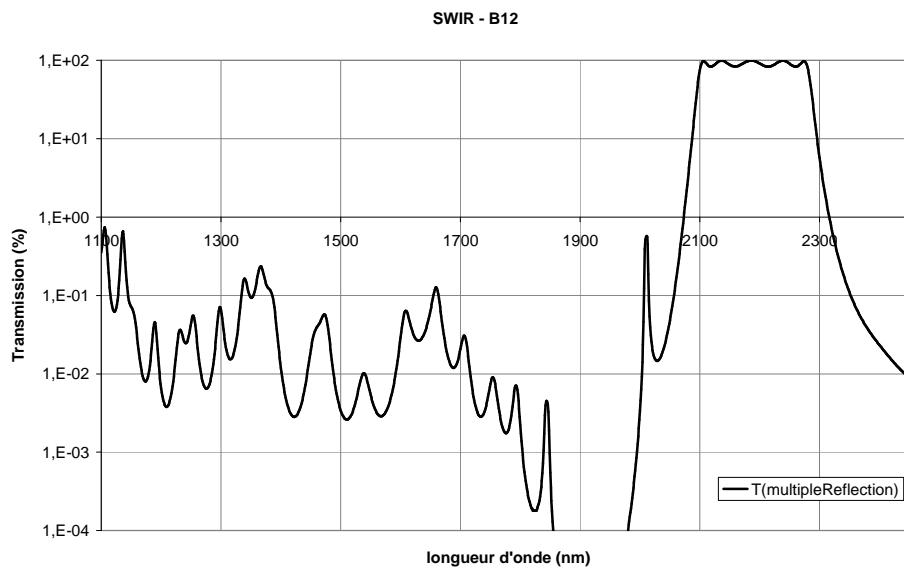


Figure 90 : Profil théorique de la voie SWIR B12.

Les performances spectrales théoriques de la voie B12 sont résumées dans le Tableau 15.

B12	<i>Specification</i>	<i>Théorique</i>
Oscillations	-	OK
λ_0	2190 (± 10)	2190,7
FWHM	180 (± 10)	188,2
Trej à 1%	<1%	0,43%
Trej à 5%	<5%	0,56%

Tableau 15 : Performances spectrales théoriques de la voie B12.

II.3. Caractérisation spectrale avant assemblage

L'empilement contenant le filtre passe-bande étant le plus critique vis-à-vis des spécifications, celui-ci est déposé en premier sur une face, puis mesuré afin de vérifier sa conformité aux spécifications de départ en termes de centrage et de largeur de bande. Il s'agit alors d'effectuer quelques points de mesure dans un domaine spectral réduit autour de la bande passante du

filtre, avec une fine résolution spectrale, typiquement 1 nm. Si le filtre réalisé est conforme aux spécifications, le dépôt de la fonction de blocage sur la seconde face de l'allumette est réalisé, et le composant est à nouveau mesuré afin d'estimer sa rejection. Il s'agit alors d'effectuer quelques points de mesure sur l'ensemble du domaine spectral, avec une résolution spectrale plus importante de 5 nm.

L'ensemble des mesures est réalisé sur le banc de caractérisation locale dédié, présenté dans le chapitre précédent.

II.3.1. Voies VNIR

Pour l'étude de la bande passante de la voie B2, le domaine spectral de mesure est fixé entre 440 et 570 nm, et les mesures sont effectuées avec des résolutions spatiale de 200 μm , et spectrale de 1 nm. La Figure 91 présente la transmission mesurée en 4 points d'une allumette de la voie B2 traitée 1 face.

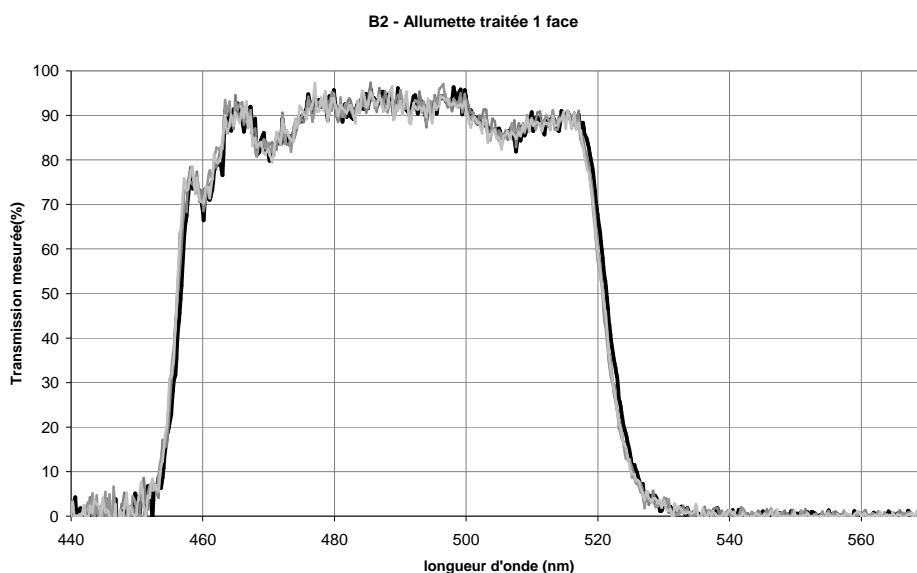


Figure 91 : 4 points de mesures sur une allumette de la voie B2 traitée 1 face.

On remarquera que les mesures sont particulièrement bruitées. Ceci provient du fait que dans les courtes longueurs d'onde le flux de la source utilisée sur notre montage est assez faible. A cela vient s'ajouter le choix d'une fine résolution spectrale, 1 nm, donc d'une fibre de sortie de faible diamètre de cœur, 200 μm . Cependant ces mesures suffisent pour déterminer le centrage et la largeur de bande du filtre. Celles-ci étant conformes aux spécifications de départ, on réalise l'empilement de blocage sur la seconde face de l'allumette et l'on mesure de nouveau le composant. Le domaine spectral de mesure est maintenant étendu de 400 nm à 1100 nm, et la résolution spectrale de 5 nm (Figure 92).

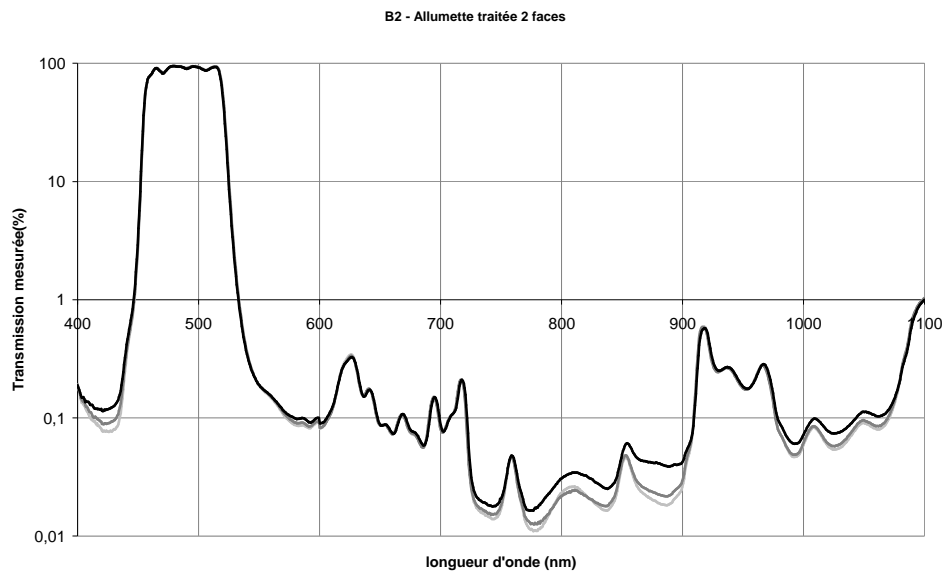


Figure 92 : 3 points de mesures sur une allumette de la voie B2 traitée 2 faces.

Les performances spectrales du filtre sont alors estimées directement à l'issue de la mesure, et présentées dans le Tableau 16.

B2	Specification	Théorique	Mesures		
			OK	OK	OK
Oscillations	-	OK	OK	OK	OK
λ_0	490 (± 5)	490,6	488,2	488,1	487,9
FWHM	65 ($\pm 2,5$)	63,6	65,2	65,1	65
Trej à 1%	<1%	0,20%	0,33%*	0,33%*	0,36%*
Trej à 5%	<5%	0,21%	0,31%*	0,32%*	0,34%*

* valeurs estimées sur le domaine spectral [400; 1100nm]

Tableau 16 : Estimation des performances spectrales d'une allumette B2.

On notera que du fait du domaine spectral de mesure, qui débute à 400 nm, la réjection ne peut être calculée sur tout le domaine VNIR, soit à partir de 340 nm. Cependant on estime relativement faible l'influence de la rejection entre 340 et 400 nm, du fait notamment du niveau assez bas de sensibilité du détecteur. De plus, les valeurs ainsi estimées sont nettement en dessous des spécifications, ce qui nous laisse confiant pour la réjection totale sur l'ensemble du domaine VNIR. On peut donc affirmer que le filtre B2 ainsi réalisé est conforme en tout point aux spécifications de départ.

De la même manière, on réalise la voie B6. Le filtre passe-bande bloqué dans les courtes longueurs d'onde est tout d'abord déposé sur une face d'allumette de RG695, puis mesuré au niveau de sa bande passante, c'est-à-dire entre 700 nm et 800 nm (Figure 93).

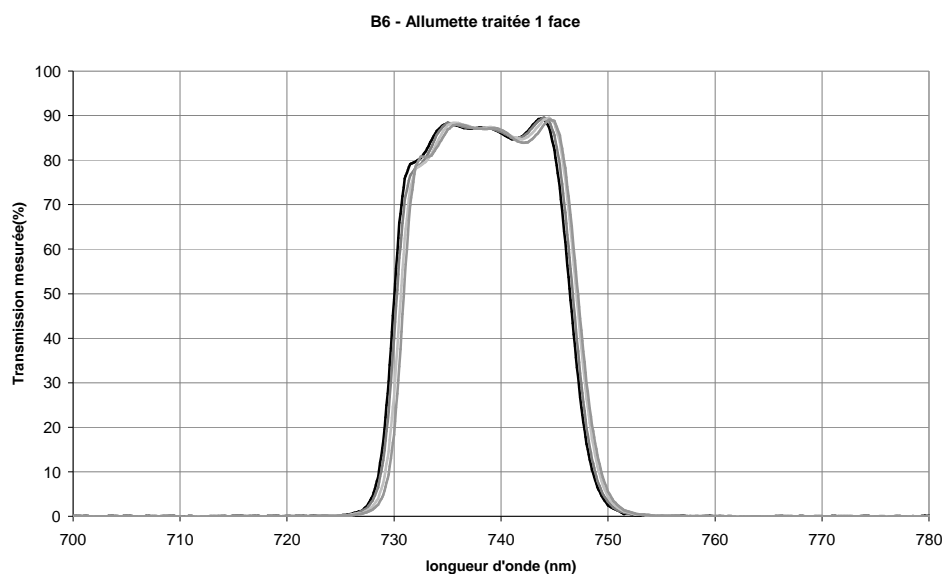


Figure 93 : 4 points de mesures sur une allumette de la voie B6 traitée 1 face.

La programmation de l'extraction des caractéristiques spectrales nous permet de valider immédiatement à l'issue de la mesure la conformité du filtre en termes de centrage, mais pas de largeur spectrale, celle-ci étant légèrement trop importante (Tableau 17).

Lambda0 (nm)	738,3	738,5	738,9	739,1
FWHM (nm)	16,8	16,8	16,7	16,6

Tableau 17 : Centrage et largeur de bande d'une allumette B6 traitée 1 face.

Cependant, l'empilement passe-bas a tout de même été réalisé sur la seconde face, et les allumettes à nouveau mesurées (Figure 94).

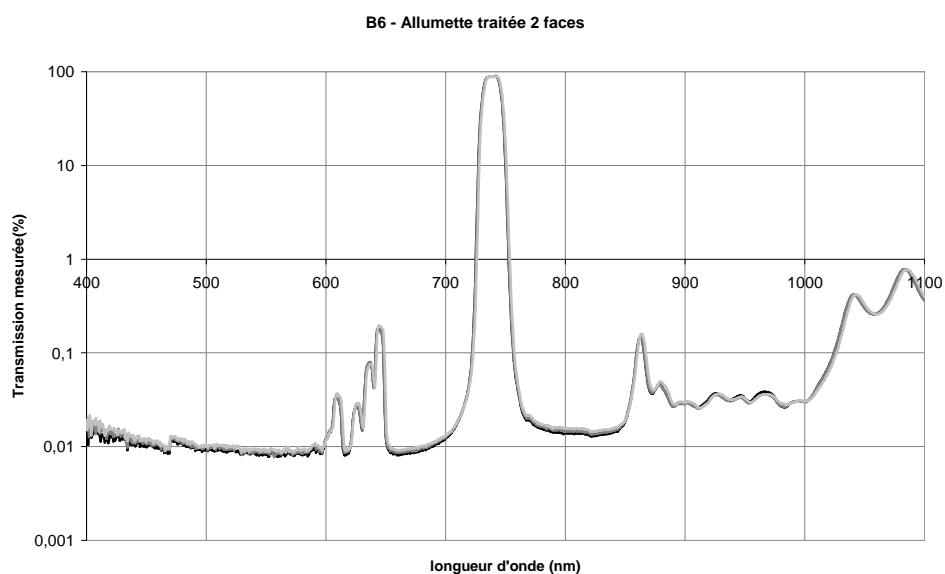


Figure 94 : 3 points de mesures sur une allumette de la voie B6 traitée 2 faces.

Là encore, on estime les performances spectrales du filtre entre 400 et 1100 nm, et on constate que le filtre est conforme sauf en terme de largeur spectrale (Tableau 18).

B6	Specification	Théorique	Mesures		
Oscillations	-	OK	OK	OK	OK
λ_0	740 (± 3)	740,0	738,6	739,0	739,4
FWHM	15 ($\pm 1,5$)	16,1	16,7	16,7	16,7
Trej à 1%	<1%	0,35%	0,79%*	0,81%*	0,84%*
Trej à 5%	<5%	0,35%	0,85%*	0,87%*	0,88%*

* valeurs estimées sur le domaine spectral [400; 1100nm]

Tableau 18 : Estimation des performances spectrales d'une allumette B6.

De même que pour la voie B2, les taux de réjection sont estimés entre 400 et 1100 nm, mais nous paraissent tout de même représentatifs de la réjection totale du filtre.

II.3.2. Voies SWIR

La démarche adoptée pour mesurer les voies du domaine SWIR reste la même que celle mise en œuvre pour les voies VNIR. Cependant notre domaine de mesures étant limité par l'analyseur optique de spectre à 1700 nm, il n'est plus envisageable d'estimer la réjection, qui théoriquement doit être calculée sur tout le domaine SWIR, à savoir jusqu'à 2460 nm.

Le filtre de la voie B10 est donc déposé sur une face des allumettes, puis mesuré dans le domaine spectral allant de 1320 nm à 1440 nm (Figure 95).

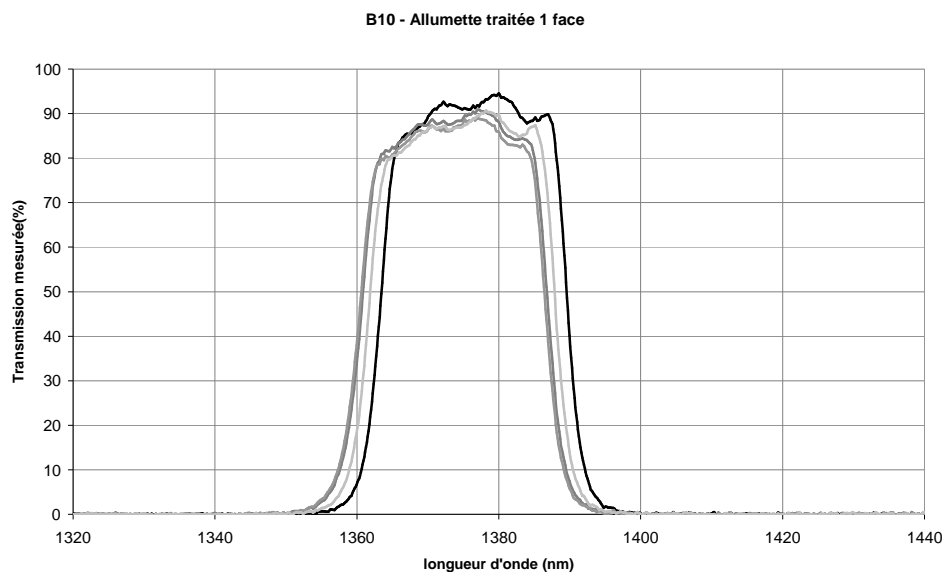


Figure 95 : 4 points de mesures sur une allumette de la voie B10 traitée 1 face.

L'extraction automatique des caractéristiques spectrales du filtre nous permet d'affirmer que ce dernier possède bien le centrage et la largeur de bande désirée. Les allumettes sont donc traitées sur leur seconde face avec le filtre de blocage, et à nouveau mesurées (Figure 96).

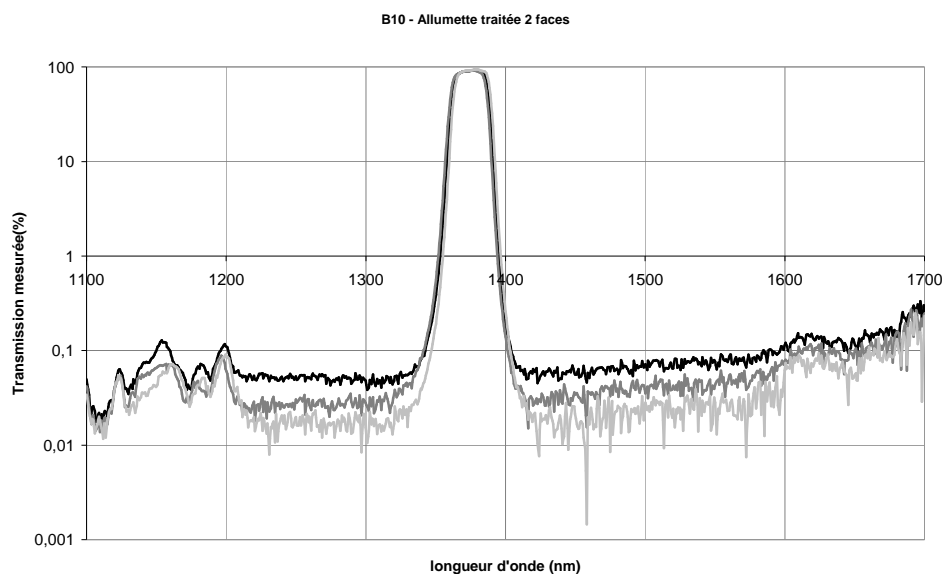


Figure 96 : 3 points de mesures sur une allumette de la voie B10 traitée 2 faces.

Les performances spectrales, à l'exception de la réjection, d'une allumette de la voie B10 sont évaluées et présentées dans le Tableau 19. On constate alors la conformité en tout point de la réalisation par rapport aux spécifications.

B10	Spécification	Théorique	Mesures			
Oscillations	-	OK	OK	OK	OK	OK
λ_0	$1375 (\pm 10)$	1372,9	1376,5	1373,8	1373,5	1374,8
FWHM	$20 (\pm 10)$	26,5	26,3	26,3	26,3	26,4

Tableau 19 : Estimation des performances spectrales d'une allumette B10.

De la même manière, on réalise et on mesure la voie B11. Les mesures du filtre sur un domaine réduit autour de la bande passante, réalisées avec une résolution spectrale de 1 nm sont présentées sur la Figure 97.

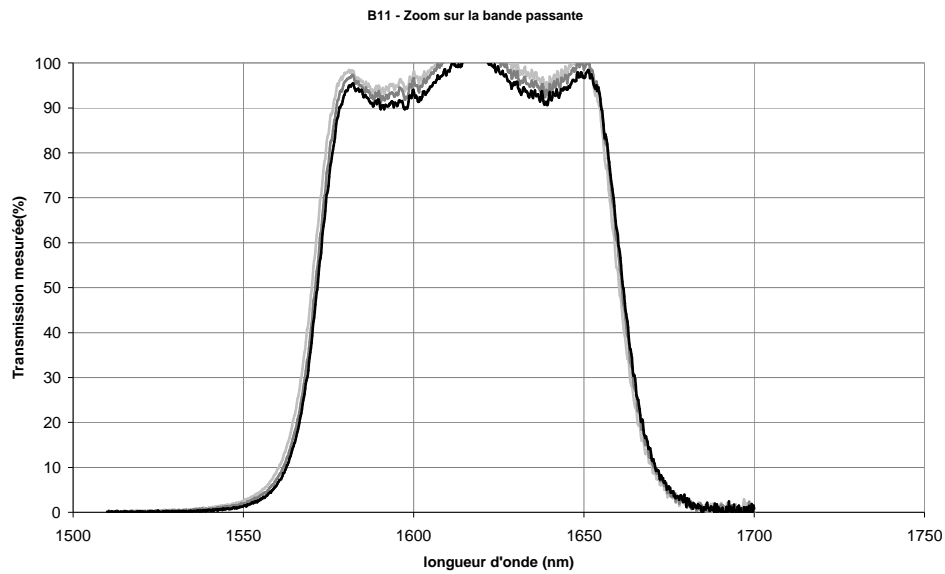


Figure 97 : Zoom sur la bande passante du filtre d'une allumette B11.

La Figure 98 quant à elle nous présente des mesures effectuées sur l'ensemble du domaine spectral de mesure, avec une résolution spectrale de 5 nm.

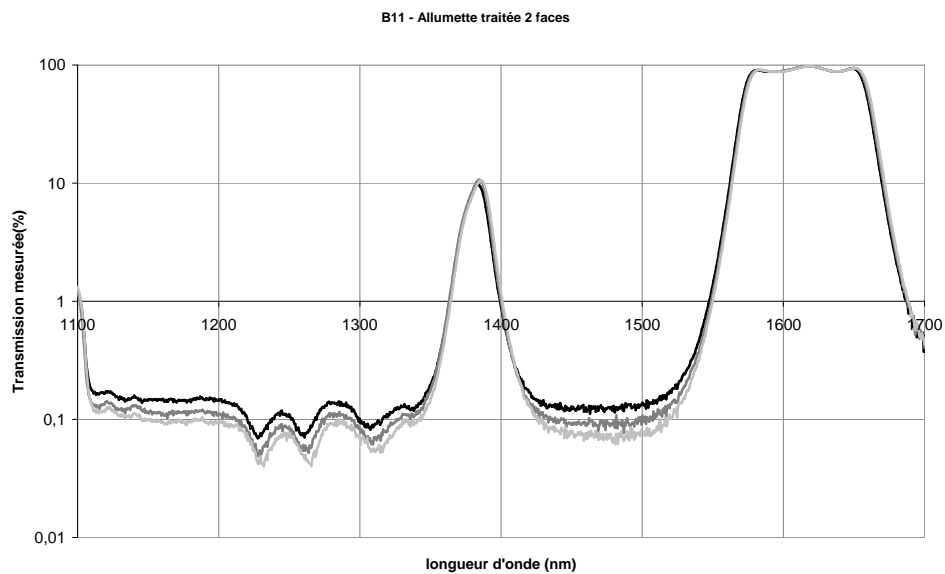


Figure 98 : 3 points de mesures sur une allumette de la voie B11 traitée 2 faces.

On notera qu'on observe un pic de transmission à environ 10 % vers 1385 nm, qui était prévu par le calcul théorique des empilements, ceux-ci présentant tout de même des taux de réjection conformes aux spécifications.

En termes de performances spectrales, celles-ci sont présentées dans le Tableau 20. On constate là encore la conformité du filtre de la bande B11 avec les spécifications initiales.

B11	Specification	Théorique	Mesures		
Oscillations	-	OK	OK	OK	OK
λ_0	1610 (± 10)	1611,7	1615,2	1616,1	1616,6
FWHM	90 (± 10)	91,4	89,5	89,4	89,3

Tableau 20 : Estimation des performances spectrales d'une allumette B11.

Ainsi, on possède maintenant des allumettes portant les fonctions de filtrage spectral des 4 bandes retenues : B2 et B6 dans le domaine VNIR et B10 et B11 dans le domaine SWIR, dont la conformité des performances spectrales a été validée par des mesures sur le banc de caractérisation dédié.

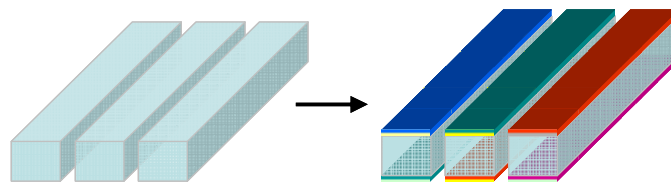


Figure 99 : Etape de fabrication réalisée = dépôt des fonctions optiques.

II.4. Absorbant des faces latérales des allumettes

Les traitements absorbants déposés sur les faces latérales des allumettes ont pour but de minimiser la lumière parasite dans le système, l'idée étant d'absorber au maximum la lumière provenant de l'intérieur de l'allumette.

Les empilements sont déposés par technologie de pulvérisation cathodique magnétron, procédé particulièrement bien adapté au dépôt de couches métalliques denses. On notera que la transmission est annulée quelle que soit l'incidence de la lumière du fait de la structure même du traitement absorbant qui comporte une couche métallique opaque.

Ainsi, les allumettes sont désormais traitées 4 faces et prêtes à être intégrées dans la structure mécanique.

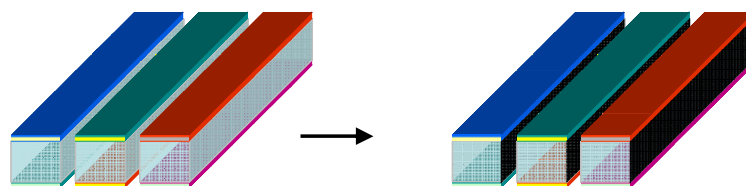


Figure 100 : Etape de fabrication réalisée = dépôt des absorbants.

III. Réalisation des fenêtres d'entrée et de sortie

En parallèle on réalise les masques d'entrée et sortie sur des fenêtres indépendantes qui seront, en dernière étape, assemblées au sein du composant final.

III.1. Structure des fenêtres

III.1.1. Principales caractéristiques

Comme il a été vu précédemment, le besoin en terme de fonction optique sur les fenêtres est différent selon que l'on se place côté détecteur ou côté télescope du composant. En effet, pour minimiser les phénomènes de lumière parasite, la fenêtre placée côté détecteur doit porter une double fonction absorbeur, alors que l'on choisira pour la fenêtre placée côté télescope une fonction absorbeur sur laquelle on viendra ajouter une fonction miroir.

Afin de maximiser la transmission dans les bandes, un traitement antireflet est placé au niveau des ouvertures des fenêtres. Le substrat est alors traité antireflet sur toute sa surface en première étape de fabrication. Il convient donc d'adapter les formules des empilements en prenant en compte l'antireflet. On notera que cela conduit à un traitement un peu plus complexe que s'il avait été placé directement au contact du verre. La seconde face des fenêtres, côté allumettes, est quant à elle traitée pleine face antireflet (Figure 101).

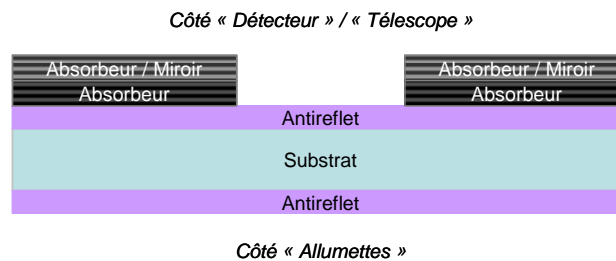


Figure 101 : Structure d'une fenêtre.

III.1.2. Définition des motifs

La détermination des motifs de structuration des fenêtres est critique puisque ce sont ces ouvertures dans les traitements absorbeurs qui fixent la largeur géométrique des bandes du composant.

Du fait notamment de l'ouverture et de l'incidence du faisceau, les deux fenêtres, celle placée côté télescope et celle côté détecteur, sont différentes géométriquement en plus de l'être optiquement. Les dimensions de ces ouvertures sont calculées à partir des caractéristiques du faisceau incident et de la taille de la zone sensible du détecteur pour chacune des bandes. En effet, il se peut que la largeur de la ligne de détection diffère d'une bande à l'autre. L'architecture du composant influe également sur les dimensions des ouvertures, il convient en effet de prendre en compte les différentes épaisseurs de substrat traversées (Figure 102). A tout cela s'ajoute enfin une tolérance de positionnement.

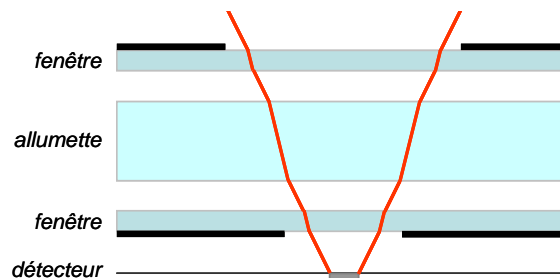


Figure 102 : Schéma de principe du calcul des ouvertures dans les absorbeurs.

L'espacement entre les différentes bandes est quant à lui dicté directement par l'espacement entre les lignes de détection. Dans le cadre de notre étude, on choisira un espacement ainsi qu'une zone sensible de détecteur constant. Les valeurs des ouvertures ainsi calculées sont environ 2,5 fois plus importantes côté télescope que côté détecteur où elles sont de l'ordre de quelques centaines de microns. Une représentation schématique des fenêtres du composant VNIR est présentée sur la Figure 103.

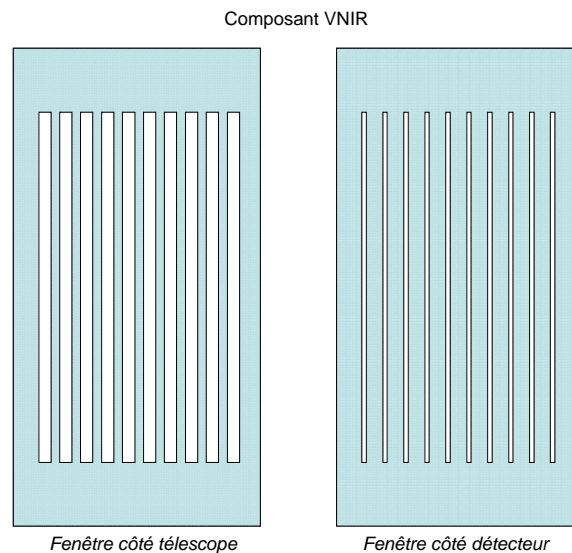


Figure 103 : Représentation schématique des fenêtres du composant VNIR.

III.2. Structuration

III.2.1. Choix du procédé de structuration

Il convient tout d'abord de définir le procédé de structuration que l'on va mettre en œuvre pour la réalisation des motifs des fenêtres. Parmi l'ensemble des procédés possibles, deux d'entre eux ont retenu notre attention car ils nous apparaissent potentiellement adaptés à nos besoins : la gravure humide et le lift off.

Pour une configuration de motifs comme la nôtre, l'un des atouts majeurs de la gravure humide réside dans le fait que, comme c'est un procédé de structuration soustractif, la résine est déposée sur le traitement, il n'y a donc aucun risque de résidus de résine dans le fond des bandes, comme cela peut être le cas avec des procédés de type additifs. De plus, la gravure humide présente une meilleure définition des motifs, due notamment au fait que la structuration se réalise chimiquement, et non mécaniquement. En effet, dans le cas du lift off, l'opération de retrait de résine engendre une rupture brusque de traitement qui n'est pas sans risque. Cependant le procédé de gravure humide nécessite le développement de procédures propres à chaque empilement ainsi qu'aux motifs à réaliser. Il convient en effet pour chaque couche de l'empilement d'optimiser les paramètres de gravure que sont notamment la solution et le temps d'immersion. De plus les empilements absorbants étant fréquemment constitués de couches diélectriques de type SiO_2 , de nature proche du substrat, il faut alors être particulièrement attentif à la structure de l'empilement. Le risque majeur est alors de graver, ne serait-ce que légèrement, le substrat, ou l'antireflet, ce qui conduirait alors à des pertes par diffusion dans les bandes. Afin de s'assurer d'un bon arrêt de la gravure, la dernière couche doit être métallique, pour que les bains de gravure soient totalement différents, et suffisamment épaisse. Cette

dernière contrainte n'étant pas compatible avec la fonction absorbeur du côté du substrat, le procédé de gravure humide n'est pas applicable dans notre cas.

On choisira donc comme procédé de structuration le lift off qui possède en outre l'avantage d'être beaucoup plus rapide que la gravure. Dans ce cas, le procédé de réalisation des fenêtres peut se résumer selon la Figure 104.

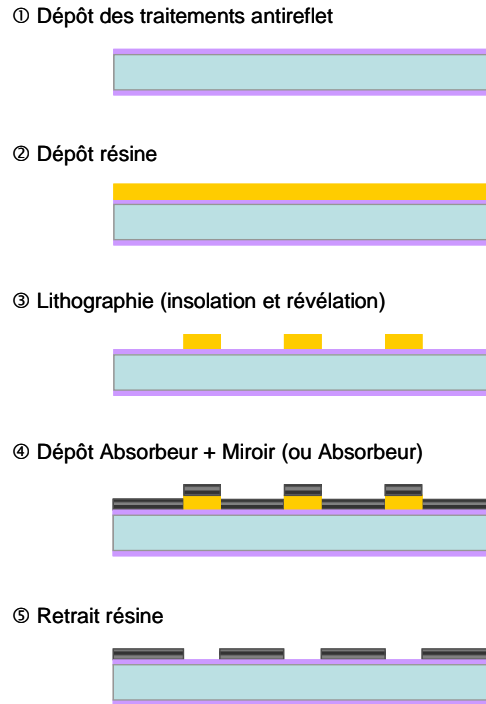


Figure 104 : Principales étapes de réalisation des fenêtres par lift off.

III.2.2. Géométrie du substrat de départ

En ce qui concerne les substrats initiaux, deux solutions s'offrent à nous : choisir des substrats de dimensions supérieures ou bien directement à la bonne géométrie. Dans le cas des fenêtres, outre les aspects liés à la manipulation et aux outillages, la taille des substrats influe directement sur le procédé de structuration.

La solution d'un substrat rectangulaire, déjà aux bonnes dimensions, apparaît particulièrement intéressante puisqu'elle ne nécessite pas d'étape de découpe, étape identifiée parmi les plus critiques du procédé. Cependant, le dépôt de la résine peut alors devenir problématique du fait de cette géométrie rectangulaire du substrat d'une part, et du positionnement des motifs relativement près du bord du composant d'autre part. En effet, le principe de dépôt de la résine consiste à en étaler une goutte par force centrifuge (spin coating). Le substrat est maintenu sur une tournette par aspiration, dont la vitesse de rotation est calculée pour obtenir une couche fine d'épaisseur constante sur toute la surface (Figure 105). Dans le cas d'un substrat rectangulaire, la répartition par force centrifuge nous laisse craindre une mauvaise uniformité d'épaisseur notamment au niveau des angles du substrat.

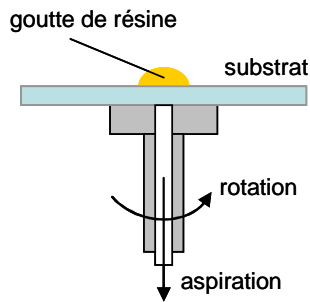


Figure 105 : Schéma de principe d'une tournette d'étalement de résine.

De plus ce mode de répartition de la résine engendre un bourrelet à la périphérie du substrat, où l'épaisseur de résine est plus importante. Typiquement la taille de cette zone est de quelques millimètres jusqu'à 1 cm, et dépend directement du type de résine utilisée. On distingue en effet deux types de résines photosensibles, positive et négative, selon que les zones exposées au rayonnement UV deviennent plus ou moins solubles que les zones protégées par le masque. Dans le cas d'une résine positive, la zone insolée devient plus soluble, on retrouve donc après l'étape de photolithographie le même motif sur le substrat que sur le masque ; dans le cas d'une résine négative, la zone insolée devient moins soluble et on obtient donc le motif complémentaire (Figure 106).

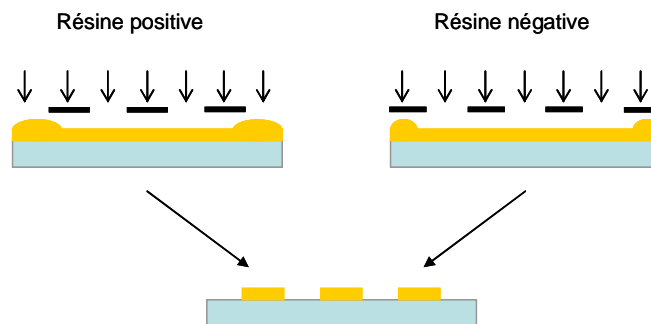


Figure 106 : Obtention de motifs selon le type de résine photosensible.

De manière générale, les résines positives sont préférées car leur résolution spatiale est meilleure. Elles sont également plus faciles à enlever. En revanche la taille du bourrelet est supérieure par rapport au cas d'une résine négative. En fonction de la proximité des motifs par rapport aux bords du composant, la présence de ce bourrelet peut dégrader la résolution des motifs extérieurs, puisqu'il sera alors insolé selon les paramètres, optimisés pour l'épaisseur standard de résine au centre du composant. De même, en l'absence de motif dans cette zone, cette résine doit être retirée au moment de l'étape de révélation, et dans le cas où elle doit être insolée pour être enlevée, on peut craindre un mauvais retrait du fait toujours de ces paramètres non parfaitement adaptés.

En résumé, lorsque la zone utile correspond à l'ensemble de la surface du composant, il est préférable d'utiliser une résine négative. Ceci permet d'une part de minimiser la zone morte aux extrémités du composant, et d'autre part de retirer parfaitement la résine du bord lorsqu'il n'y a aucun motif, puisque dans le cas des résines négatives, on retire au moment de la révélation la résine non insolée (Figure 107). Cependant, la manipulation et l'outillage de ces substrats à la géométrie particulière apparaissent moins évidents.

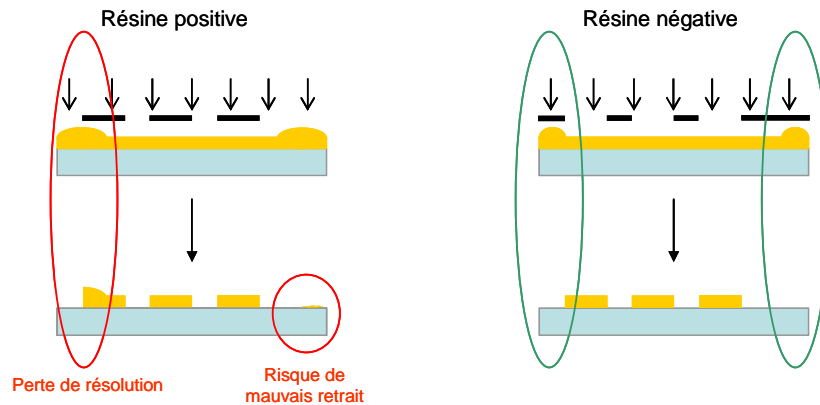


Figure 107 : Avantages de la résine négative dans le cas d'une utilisation de la surface complète du composant.

Si au lieu de partir d'un substrat rectangulaire aux dimensions requises, on choisit un substrat de dimensions supérieures, par exemple circulaire, on peut alors utiliser une résine photosensible positive qui offre une meilleure résolution. Cependant, la surface de traitement à enlever est plus importante, ce qui a pour effet d'augmenter le risque de re-dépôt au moment de l'opération de lift off. De plus, l'intégration d'une étape de découpe n'est pas sans risque pour ce composant à forte valeur ajoutée et particulièrement fragile du fait de sa faible épaisseur. On notera que si l'alignement de la fenêtre au sein du composant final est réalisé mécaniquement, le positionnement et la précision de la découpe doivent alors être typiquement du micron.

Ces deux alternatives, partir d'un substrat de dimensions supérieures ou directement à la bonne géométrie, offrent donc chacune des avantages et des inconvénients, mais aucune n'apparaît a priori comme particulièrement mieux adaptée que l'autre. Nous avons donc choisi de tester en parallèle ces deux solutions: substrat circulaire avec résine positive et substrat rectangulaire avec résine négative.

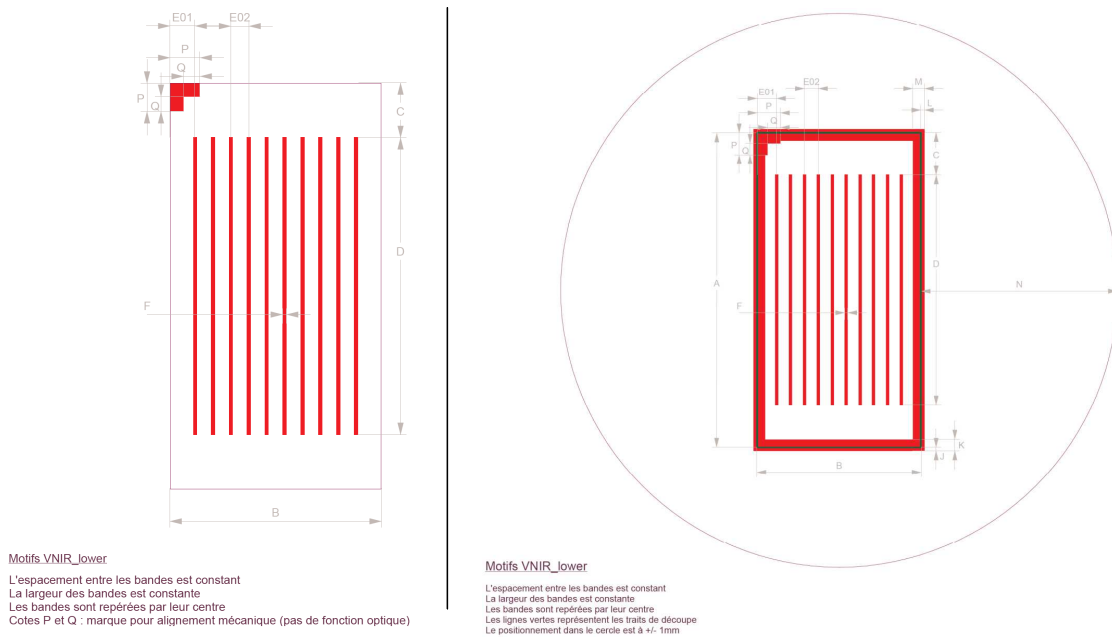
III.3. Réalisation des fenêtres

III.3.1. Masques lithographiques

Les masques optiques pour la lithographie sont constitués de plaques de quartz sur lesquelles sont réalisés des dépôts de chrome gravés par faisceau d'électrons définissant les motifs.

Le dessin des masques lithographiques est réalisé directement à partir de la détermination des motifs de chacune des fenêtres, en prenant en compte en plus les problématiques liées à l'alignement du masque sur le substrat lors de l'étape d'insolation. Celui-ci s'effectue généralement par rapport aux bords du composant qui doivent alors être de bonne qualité et visibles à travers le masque.

Dans le cas du substrat circulaire, des marques d'alignement pour la découpe sont intégrées au dessin du masque lithographique afin de garantir le meilleur positionnement des traits de découpe par rapport aux motifs. Pour faciliter cette étape de découpe, on choisit également de créer de nouvelles ouvertures permettant d'éviter de découper dans le traitement absorbant, tout en prenant garde à ce que ces ouvertures ne débordent pas sur la zone utile du composant (Figure 108).



Les motifs en rouge représentent la résine

Figure 108 : Dessins des masques lithographiques pour la fenêtre VNIR côté détecteur dans le cas d'un substrat rectangulaire (à gauche) et circulaire (à droite).

On remarquera que les motifs des fenêtres sont parfaitement symétriques, rendant impossible une éventuelle orientation des substrats, qui de plus sont transportés entre l'étape de résinage, sous-traitée à l'extérieur, et l'étape de dépôt réalisée en interne à CILAS. Les résines photosensibles étant transparentes et de faible épaisseur, la distinction de la face résinée du substrat n'est alors pas évidente, et le risque de confusion est élevé. Pour éviter toute mauvaise orientation des substrats principalement au moment du dépôt des absorbeurs, on choisit de placer une marque dans un angle, permettant de garantir avec certitude l'orientation du substrat. Dans le cas de la configuration rectangulaire, le fait que cette marque se situe à l'extrémité du substrat engendre une légère perte de résolution du motif mais qui est sans importance ici puisque celui-ci n'a qu'une fonction de repérage et pas de fonction optique.

III.3.2. Exemples de réalisation

Les substrats sont tout d'abord traités sur leurs deux faces par des traitements antireflets. Des exemples de mesures en réflexion d'antireflets déposés sur ces fenêtres sont présentés sur la Figure 109.

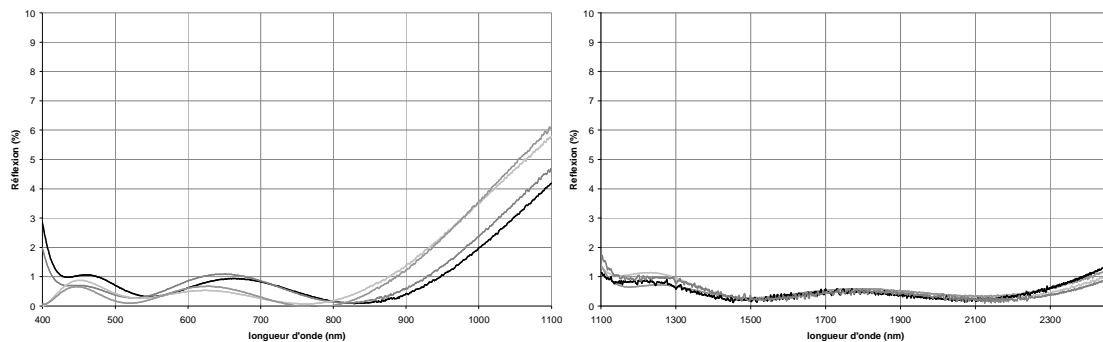


Figure 109 : Réalisations de traitements antireflets VNIR (à gauche) et SWIR (à droite).

Puis les traitements absorbants sont réalisés et structurés par technologie de lift off (Figure 110). Comme dans le cas des absorbeurs déposés sur les faces latérales des allumettes, ces empilements sont déposés en pulvérisation cathodique magnétron.

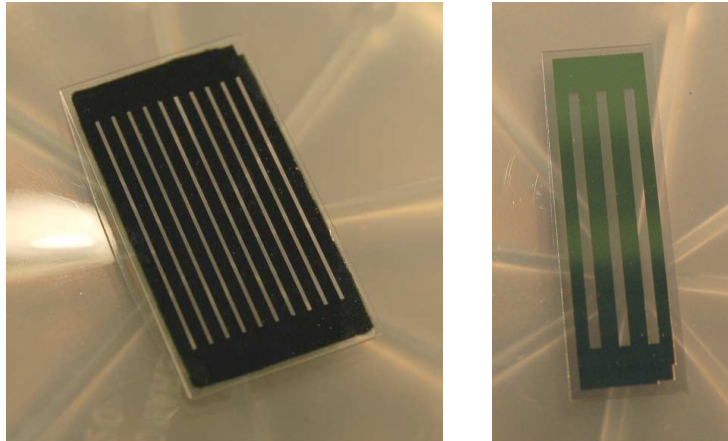


Figure 110 : Photographie d'une fenêtre VNIR « côté détecteur » (à gauche) et SWIR « côté télescope » (à droite).

Pour les fenêtres « côté télescope », le traitement absorbant est surmonté d'une fonction miroir. La Figure 111 montre l'exemple d'une fenêtre VNIR « côté télescope » photographiée sur ses deux faces.



Figure 111 : Photographie de fenêtres VNIR « côté télescope », face miroir (à gauche) et absorbeur (à droite).

Un exemple de mesure, en réflexion, des traitements absorbants réalisés sur ces fenêtres est présenté sur la Figure 112. Globalement, les performances de ces dépôts sont plus que satisfaisantes. On atteint un taux de réflexion inférieur à 3 % sur une grande partie de chacun des deux domaines spectraux.

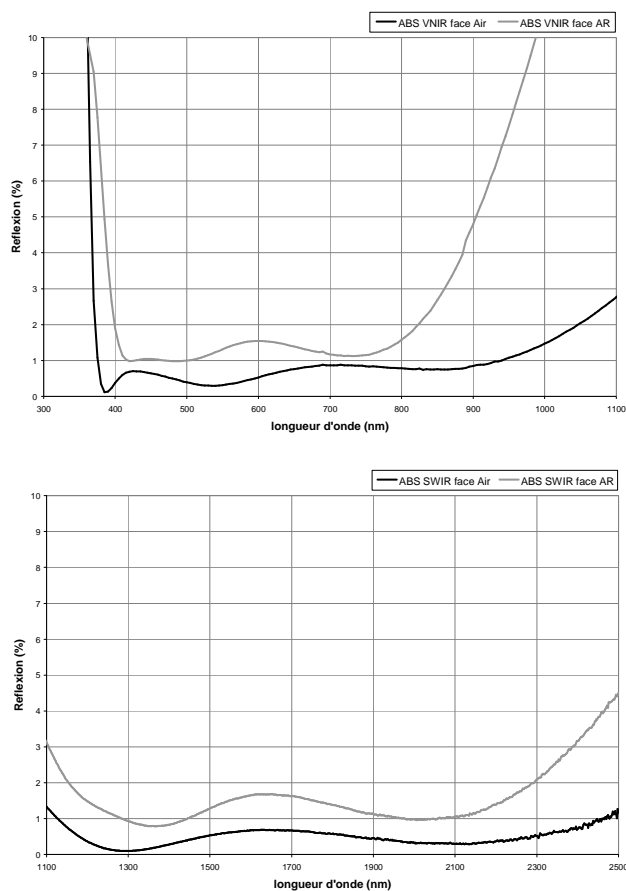


Figure 112 : Mesures en réflexion de traitements absorbants du composant VNIR (en haut) et SWIR (en bas).

Une observation visuelle au microscope optique permet de valider le procédé de structuration par lift off. En effet on constate une bonne définition des bandes dans l'absorbeur (Figure 113).

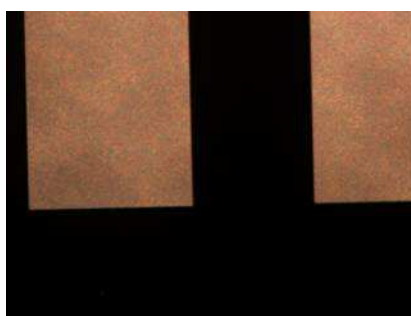


Figure 113 : Observation au microscope optique (x50) de la définition des bandes d'une fenêtre VNIR « côté télescope ».

Des fenêtres VNIR et SWIR ont ainsi été réalisées selon ce procédé, à partir des deux configurations de substrats : circulaire et rectangulaire, les deux filières ayant été menées en parallèle jusqu'au bout avec succès. A l'issue de ces réalisations, aucune des deux solutions n'est apparue comme spécialement mieux adaptée que l'autre dans le cas particulier de nos fenêtres.

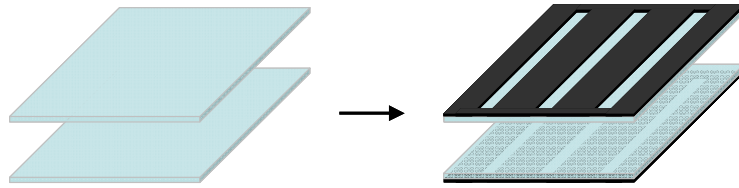


Figure 114 : Etape de fabrication réalisée = dépôt et structuration des masques absorbeurs.

IV. Qualification

Enfin pour chaque composant, VNIR et SWIR, les allumettes traitées dont la caractérisation spectrale a été présentée précédemment ont été collées par leurs extrémités dans un cadre en titane (Figure 115).

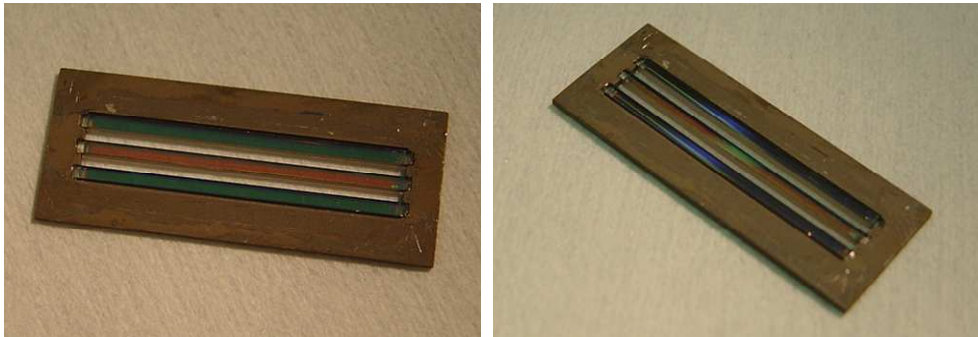


Figure 115 : Photographies des allumettes du composant SWIR collées dans le cadre.

Puis les deux fenêtres, « absorbeur/absorbeur » côté détecteur et « absorbeur/miroir » côté télescope, ont ensuite été collées de part et d'autre du cadre (Figure 116).

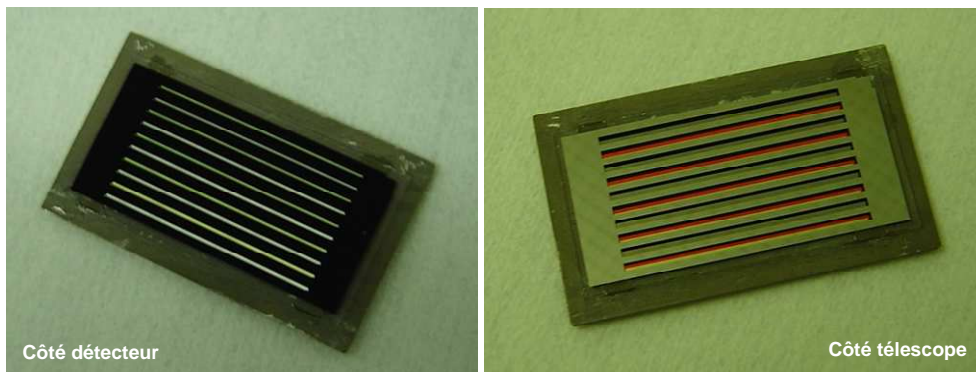


Figure 116 Photographies du composant VNIR.

Les composants ainsi réalisés ont alors été caractérisés spectralement avant et après différents tests permettant de valider leur qualification pour des applications spatiales.

IV.1. Caractérisation spectrale

Une procédure particulière a été mise en place afin de repérer de manière répétable les points de mesures pour permettre une comparaison des résultats avant et après les tests de qualification. Il s'agit alors de définir trois points, dont un au centre de l'allumette et deux aux extrémités. Ces mesures ont été réalisées sur le banc de caractérisation dédié.

Toutefois, afin de calibrer correctement les flux, il aurait fallu un échantillon de référence ayant une géométrie identique à celle des échantillons mesurés, structuration spatiale comprise, mais sans traitements optiques. En l'absence d'une telle référence, les mesures ne seront que relatives en ce qui concerne le niveau de transmission. Elles sont en revanche correctes pour les caractéristiques essentielles que sont le centrage et la largeur des bandes passantes.

IV.1.1. Composant VNIR

Le composant VNIR est constitué de 10 allumettes, alternance des voies B2 et B6, et de 2 fenêtres absorbeurs.

On effectue tout d'abord une mesure au centre de chaque allumette sur un large domaine spectral, avec une résolution spatiale de 100 μm et spectrale de 5 nm, soit une fibre de 600 μm de diamètre de cœur (Figure 117).

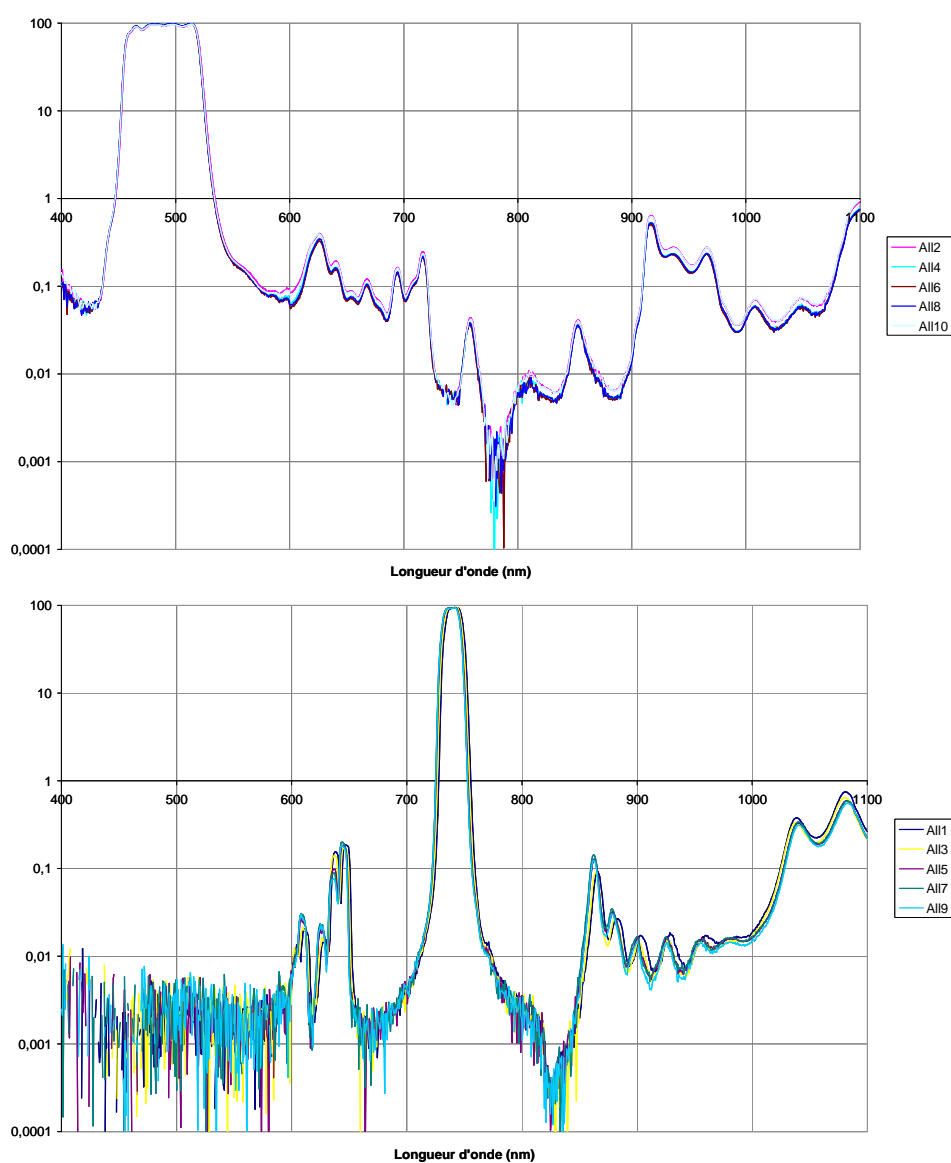


Figure 117 : Allumettes de la voie B2 (en haut) et B6 (en bas), avant les tests de qualification.

Puis on réduit le domaine spectral autour de la bande passante du filtre, et on effectue 3 mesures, avec une résolution spectrale de 1 nm. Les courbes présentées sur la Figure 118 ne correspondent qu'au point du centre.

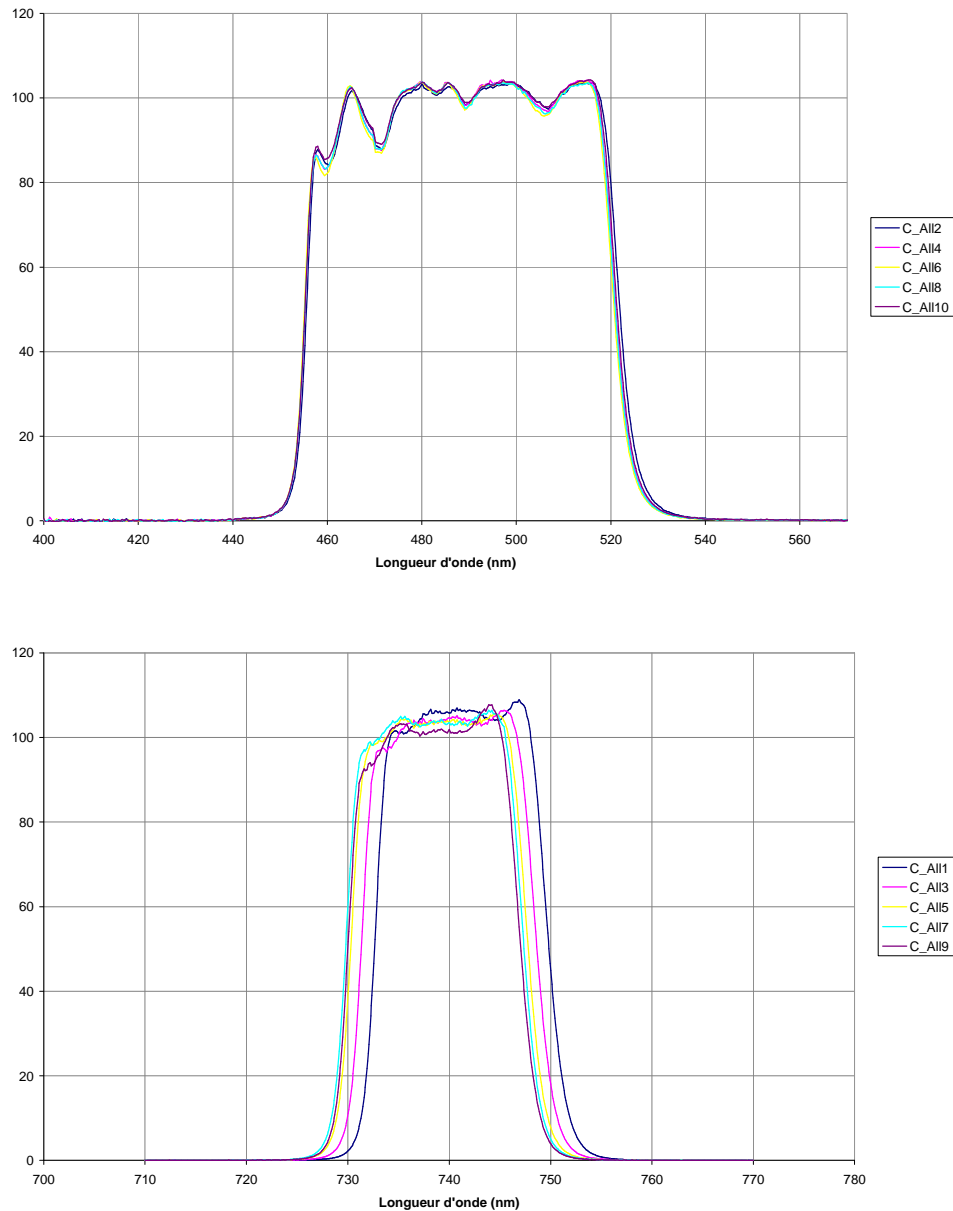


Figure 118 : Zoom sur la bande passante des allumettes de la voie B2 (en haut) et B6 (en bas), avant les tests de qualification.

On détermine ensuite à partir de ces courbes les performances spectrales des filtres en termes de centrage et de largeur de bande.

VNIR	All1 – B6			Spécifications	
λ_0 (nm)	740,7	741,2	741,4	740	± 3
FWHM (nm)	17	17	17	15	$\pm 1,5$
	All2 – B2			Spécifications	
λ_0 (nm)	488,5	488,7	488,8	490	± 5
FWHM (nm)	65,9	66,1	66,2	65	$\pm 2,5$
	All3 – B6			Spécifications	
λ_0 (nm)	739,4	740	740,2	740	± 3
FWHM (nm)	17,1	17,1	17,1	15	$\pm 1,5$
	All4 – B2			Spécifications	
λ_0 (nm)	488,2	488,1	487,9	490	± 5
FWHM (nm)	65,5	65,6	65,5	65	$\pm 2,5$
	All5 – B6			Spécifications	
λ_0 (nm)	739,3	739	738,4	740	± 3
FWHM (nm)	17,4	17,4	17,4	15	$\pm 1,5$
	All6 – B2			Spécifications	
λ_0 (nm)	487,8	487,9	487,7	490	± 5
FWHM (nm)	65,3	65,4	65,3	65	$\pm 2,$
	All7 – B6			Spécifications	
λ_0 (nm)	738,9	738,6	738	740	± 3
FWHM (nm)	17,4	17,4	17,5	15	$\pm 1,5$
	All8 – B2			Spécifications	
λ_0 (nm)	487,9	488,1	488,1	490	± 5
FWHM (nm)	65,3	65,5	65,4	65	$\pm 2,5$
	All9 – B6			Spécifications	
λ_0 (nm)	738,4	738,5	738,9	740	± 3
FWHM (nm)	16,9	16,9	16,8	15	$\pm 1,5$
	All10 – B2			Spécifications	
λ_0 (nm)	488,4	488,3	488,1	490	± 5
FWHM (nm)	65,7	65,8	65,8	65	$\pm 2,5$

Tableau 21 : Performances spectrales du composant VNIR avant les tests de qualification.

Le centrage des filtres B2 et B6 est conforme aux spécifications pour toutes les allumettes du composant VNIR. La largeur à mi-hauteur est conforme pour le filtre B2 mais légèrement trop élevée pour le filtre B6, phénomène déjà mis en avant lors de la caractérisation des allumettes avant assemblage.

IV.1.2. Composant SWIR

Le composant SWIR est constitué de 3 allumettes, alternance des voies B10 et B11, et de 2 fenêtres absorbeurs.

Comme pour le composant VNIR, on effectue tout d'abord une mesure au centre de chaque allumette sur un large domaine spectral, avec une résolution spatiale de 100 μm et spectrale de 5 nm (Figure 119).

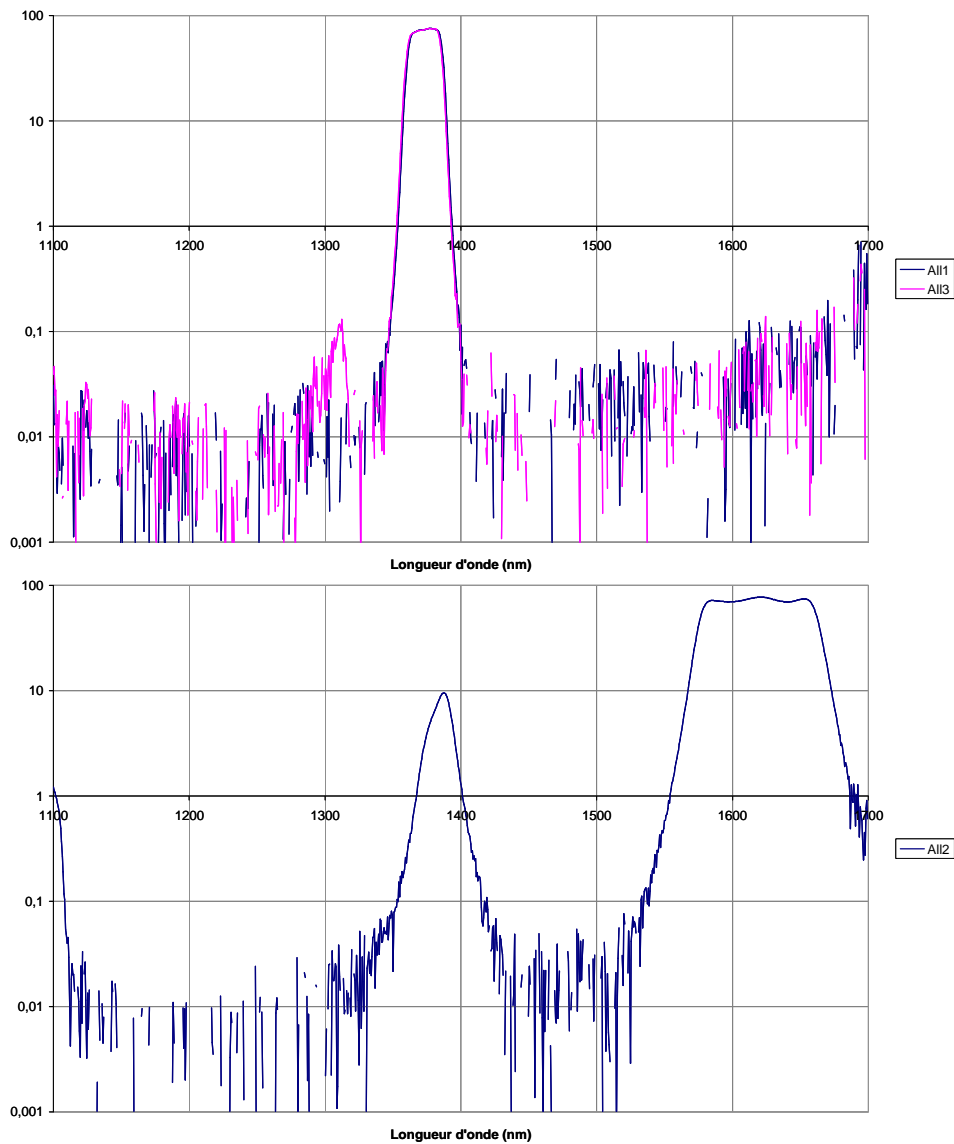


Figure 119 : Allumettes de la voie B10 (en haut) et B11 (en bas), avant les tests de qualification.

Puis on réduit le domaine spectral autour de la bande passante du filtre, et on effectue 3 mesures, avec une résolution spectrale de 1 nm (Figure 120).

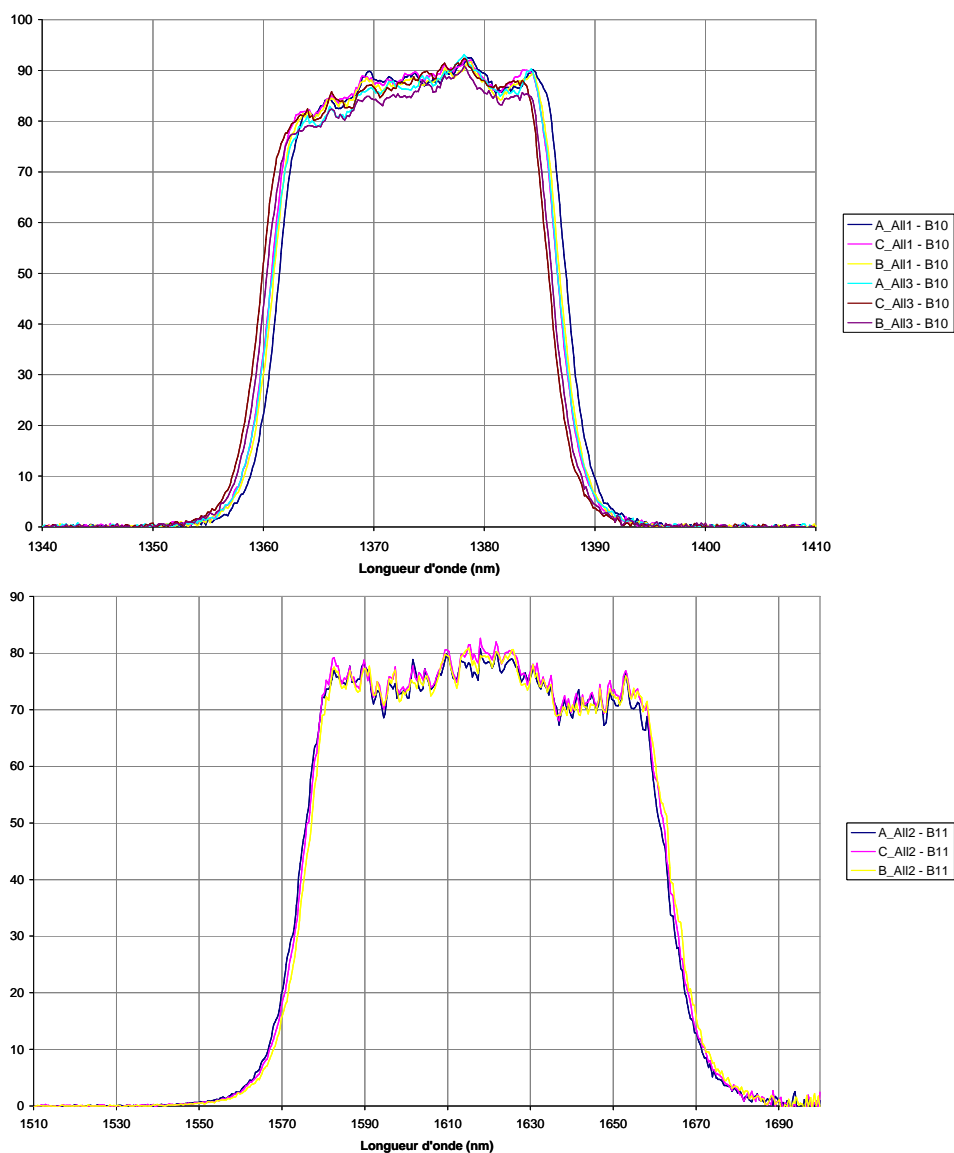


Figure 120 : Zoom sur la bande passante des allumettes de la voie B10 (en haut) et B11 (en bas), avant les tests de qualification.

A partir de ces courbes, on estime les performances spectrales du composant et on constate que celles-ci sont conformes, en termes de centrage et de largeur de bande, pour toutes les allumettes du composant SWIR (Tableau 22).

SWIR	All1 – B10			Spécifications	
λ_0 (nm)	1374,4	1373,7	1373,9	1375	± 10
FWHM (nm)	26,2	26,2	26,2	20	± 10
	All2 – B11			Spécifications	
λ_0 (nm)	1618,6	1619,1	1619,6	1610	± 10
FWHM (nm)	89,1	88,8	88,5	90	± 10
	All3 – B10			Spécifications	
λ_0 (nm)	1373,7	1372,9	1373,2	1375	± 10
FWHM (nm)	26,1	26,2	26,1	20	± 10

Tableau 22 : Performances spectrales du composant SWIR avant les tests de qualification.

IV.2. Tests de qualification

Les deux composants VNIR et SWIR ont été soumis à une série de tests de qualification. Plus précisément, il s'agissait de valider leur tenue à différents cycles thermiques, aux chocs et aux vibrations, ainsi qu'à l'humidité. L'ordre et le détail de ces tests sont présentés sur le Tableau 23.

1	Cyclage thermique	4 cycles entre -40°C/+50°C, pente de 3°C/min, palier 2h, à pression atmosphérique
2	Chocs	Niveau de chocs (g) SRS : 20 à 200Hz, 800 à 1700 et 10000Hz
3	Humidité	48H à 40°C, 90% à 95% d'humidité
4	Vide thermique	4 cycles entre -100°C/+60°C, pente de 3°C/min, palier 2h, sous vide
5	Vibrations	aléatoire et sinusoïdale suivant les 3 axes, paramètres identiques (Tableau 1)

Tableau 23 : Paramètres des tests réalisés sur les deux composants.

Hormis une défaillance constatée lors du test de vibration, l'ensemble des autres étapes a été passé avec succès par les deux composants. Le défaut rencontré concerne la tenue mécanique du lien colle/fenêtres et a été principalement imputé au nettoyage des surfaces avant assemblage, responsable d'une mauvaise accroche de l'adhésif sur la fenêtre. La procédure d'assemblage, ainsi que le choix de l'adhésif, ont cependant été validés avec succès sur les composants tests non traités présentés précédemment, et plus particulièrement ceux-ci ont subi le même test de vibrations avec succès.

Après ces tests, une série de mesures des deux composants a été à nouveau effectuée et la comparaison de ces résultats avec ceux obtenus avant les tests de qualification, ne montre pas de variation mesurable de centrage ou de largeur spectrale des filtres.

V. Conclusion

Deux composants, dont l'un possède 10 bandes spectrales, ont ainsi été réalisés par technologie d'assemblage selon les spécifications du projet de pré-développement Sentinel-2 de l'ESA.

Une réflexion a tout d'abord été menée afin de déterminer l'architecture de composant nous paraissant la mieux adaptée. L'architecture ainsi identifiée repose sur un procédé d'assemblage structural : les allumettes sont collées par leurs extrémités dans un cadre mécanique sur lequel sont ensuite collées les fenêtres portant les masques absorbeurs. Cette structure de composant

a été validée mécaniquement par la réalisation de composants tests, non représentatifs optiquement, qui ont passé avec succès une série de tests de cyclages thermiques et de vibrations.

Puis, l'étude théorique des empilements des 13 voies a été réalisée dans une configuration de traitements sur deux interfaces. Parmi ces voies, 4 d'entre elles ont été retenues pour réalisation, en fonction de leur largeur de bande et de leur position dans le domaine spectral. Les performances spectrales de ces dépôts ont été mesurées sur les allumettes avant assemblage et ont montré la conformité des fonctions optiques par rapport aux spécifications. Un traitement absorbeur a ensuite été déposé sur les faces latérales des allumettes, afin de minimiser la lumière parasite dans le système.

En parallèle, la démarche de réalisation des fenêtres a été étudiée suivant différentes possibilités, principalement concernant le choix du procédé de structuration et des substrats de départ. À l'issue de cette réflexion, le procédé de lift off a été retenu pour la structuration de ces fenêtres, dont la réalisation s'est effectuée en parallèle sur deux types de substrats initiaux, rectangulaires et circulaires. Les deux filières de fabrication ont été menées toutes deux jusqu'au bout avec succès, avec chacune ses avantages et ses inconvénients propres. Pour chacune des deux filières, les différents risques identifiés ont été levés, validant ainsi les deux solutions dans notre cas, sans qu'aucune n'apparaisse particulièrement mieux adaptée.

Ainsi des allumettes portant les fonctions de filtrage spectral et des fenêtres portant les masques absorbeurs ont été réalisées, puis assemblées au sein des deux composants prototypes, VNIR et SWIR. Ces composants ont ensuite été caractérisés spectralement avant et après des tests de qualifications. L'extraction des caractéristiques, notamment de centrage et de largeur de bande, à l'issue des mesures nous permet de valider optiquement les composants réalisés. Les performances spectrales, conformes aux spécifications, ne montrent aucune variation entre les mesures réalisées avant et après les tests de qualification.

La réalisation de ces prototypes, dont l'architecture est validée mécaniquement par les composants tests, et dont les fonctions optiques sont validées par mesures spectrales sur le banc de caractérisation dédié, confirme la faisabilité de filtres allumettes par technologie d'assemblage.

Chapitre V.

Transfert de filtres

La solution jusqu'alors proposée pour la réalisation de composants filtres allumettes était basée sur la technologie d'assemblage : chaque filtre est réalisé sur un substrat indépendant, puis tous ces éléments sont assemblés entre eux. Bien que validée par la réalisation et la qualification de composants prototypes, cette solution aboutit à des structures relativement complexes, avec de nombreuses interfaces, favorisant la lumière parasite. De plus la complexité des architectures jusque là envisagées laisse craindre une faiblesse du composant vis-à-vis de contraintes, telles que les chocs ou les vibrations. L'idée est donc de proposer un nouveau procédé de fabrication où l'épaisseur de substrat serait réduite et l'architecture globale simplifiée afin d'une part de minimiser la lumière parasite, et d'autre part d'assurer la stabilité mécanique du composant. On se propose donc de revenir à un composant ayant la structure la plus simple possible, tous les filtres étant disposés sur une unique fenêtre commune. Cependant, afin de garantir un rendement indépendant du nombre de bandes spectrales, ce procédé doit conserver, comme dans le cas de l'approche technologique par assemblage, une dissociation des risques de dépôt et de structuration des filtres. Pour cela, la nouvelle solution imaginée est basée sur une technologie dite « de transfert de filtre », et qui consiste justement à transférer un empilement multicouche d'un premier substrat vers un second. L'idée consiste alors à réaliser le dépôt et la structuration de chaque filtre sur un substrat indépendant, puis à transférer successivement chacun de ces empilements sur une fenêtre commune.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier si cette technologie de transfert peut s'appliquer à la réalisation de filtres allumettes par la validation expérimentale de ses principales étapes.

I. Principe

Le principe du transfert de filtre est basé sur celui de la séparation d'un empilement multicouche du substrat sur lequel il a été déposé.

I.1. Procédé de séparation d'empilement

Ce procédé de séparation a notamment été utilisé pour les couches denses présentant, suite au dépôt, de fortes contraintes. En effet, les méthodes de dépôt dites énergétiques créent des couches peu sensibles à l'environnement mais soumises à des contraintes internes importantes. Retirer l'empilement de son substrat est l'une des méthodes permettant de libérer le stress contenu dans l'empilement lié aux procédés énergétiques de dépôt [44].

La séparation de l'empilement peut se faire de deux manières, au moyen soit d'une couche soluble (ou sacrificielle), soit d'un substrat soluble (Figure 121). Dans chacun des cas, il convient tout d'abord d'identifier le solvant adapté permettant la dissolution complète de la couche, ou du substrat, sans dégradation de l'empilement que l'on souhaite séparer.

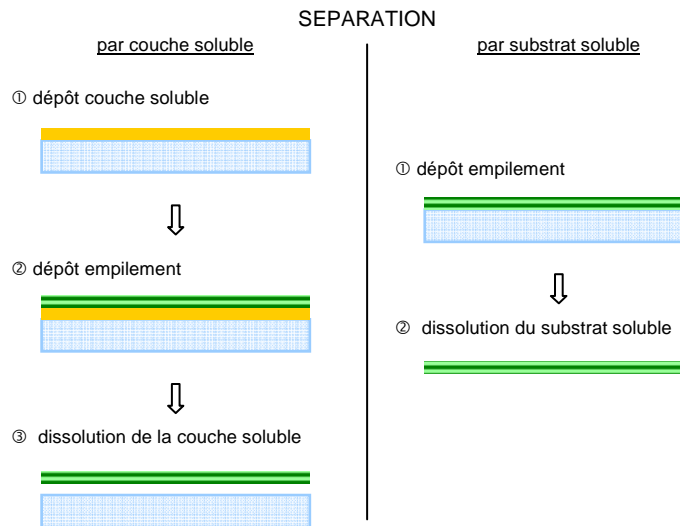


Figure 121 : Principe de séparation d'empilement par couche ou substrat soluble.

Dans le cas d'une séparation par couche soluble, celle-ci est tout d'abord déposée sur un premier substrat avant le dépôt de l'empilement multicouche. Le composant est ensuite immergé dans le solvant correspondant à la couche soluble. La dissolution de celle-ci permet alors la séparation de l'empilement du substrat sur lequel il avait été déposé. Dans le cas d'une séparation par substrat soluble, l'empilement est directement déposé sur ce substrat, puis l'ensemble est immergé dans le solvant, la dissolution du substrat entraînant alors la libération de l'empilement.

Bien que le procédé de séparation apparaisse dans un premier temps plus simple avec l'utilisation d'un substrat soluble, la mise en œuvre de cette solution reste cependant particulièrement complexe, notamment par le choix de ce substrat. En effet, celui-ci doit avoir à la fois de bonnes propriétés physiques, qui lui permettant entre autres d'être usiné, poli et de supporter le dépôt d'un empilement dense, mais également chimiques puisqu'il doit être dissout dans un solvant non agressif pour l'empilement. Cette dernière contrainte est également à prendre en compte dans le cas d'une séparation par couche soluble. Il convient en effet de s'assurer que l'on ne dégrade pas la fonction optique de l'empilement que l'on sépare. De plus, le matériau choisi doit dans ce cas pouvoir être déposé en couche mince.

Les matériaux identifiés pour la séparation sont de manière générale identiques, que celle-ci s'effectue par substrat ou par couche soluble. Il s'agit tout d'abord des matériaux hydrosolubles, qui offrent l'avantage d'un solvant, l'eau, totalement inactif sur l'empilement et simple à mettre en œuvre. Cependant du fait de leur sensibilité à l'humidité ambiante, ces couches, ou ces substrats, sont extrêmement fragiles à manipuler et nécessitent une protection particulière. Parmi les différents exemples, on citera les cristaux de chlorure de sodium qui sont à ce niveau un très bon candidat [45]. Cependant, le chlorure de sodium n'est pas un matériau habituellement utilisé en couches minces, que ce soit en tant que substrat ou en tant que couche. De ce fait, son utilisation nécessiterait de porter une attention particulière au polissage et au dépôt sur ce substrat peu commun, ou de développer son procédé de dépôt en couches minces, dans une chambre à vide adaptée. Afin de s'affranchir de ces risques, une alternative

intéressante consiste à choisir des matériaux de type métaux ou oxydes métalliques. En effet, ceux-ci bénéficient, par rapport aux matériaux hydrosolubles, d'une meilleure connaissance en termes d'usinage et de polissage d'une part, mais également de dépôts de couches minces. Ces matériaux sont de plus fréquemment utilisés pour la réalisation de microstructures, leur procédé de gravure par voie humide est donc bien connu, l'étape de séparation pouvant alors être réalisée à l'aide de solvants commerciaux. Parmi les matériaux envisageables, on peut citer des métaux comme le fer ou le nickel, et des oxydes métalliques comme l'alumine [46]. On notera qu'il est également possible de se tourner vers des matériaux de type résine, alors solubles dans des solvants organiques.

Après cette étape de séparation, le traitement, alors sans substrat, est trop fragile pour être utilisé tel quel. Il peut être repositionné sur un autre substrat [47], ou simplement tenu à ses extrémités par une armature, ce qui permet ainsi de s'affranchir de toute influence du substrat, optique, thermique,... tout en gardant la fonction optique souhaitée [48]-[49]. Cependant, la manipulation de l'empilement sans substrat est particulièrement délicate, et afin de minimiser ses risques, il peut être choisi d'assembler l'empilement sur un autre substrat avant de réaliser l'étape de séparation. On parlera alors de transfert d'empilement.

I.2. Procédé de transfert d'empilement

L'idée consiste ici à transférer un empilement multicouche directement d'un premier substrat à un second. Pour cela, l'empilement à transférer est, préalablement à l'étape de séparation, assemblé sur le second substrat. On ne présentera ici que la configuration avec une couche soluble, la même démarche pouvant être tout à fait appliquée dans le cas d'un substrat soluble.

Ce transfert peut se décomposer en 4 étapes principales. Tout d'abord, sur un premier substrat est déposée une couche pour laquelle a été identifié un solvant permettant sa dissolution. Puis l'empilement multicouche que l'on souhaite transférer est déposé sur cette monocouche. Le composant ainsi créé est ensuite assemblé, côté traitement, sur un second substrat. L'ensemble est immergé dans le solvant correspondant à la couche soluble. La dissolution de celle-ci permet alors la séparation de l'empilement du substrat sur lequel il avait été déposé. L'empilement est ainsi transféré de ce premier substrat vers le second (Figure 122).

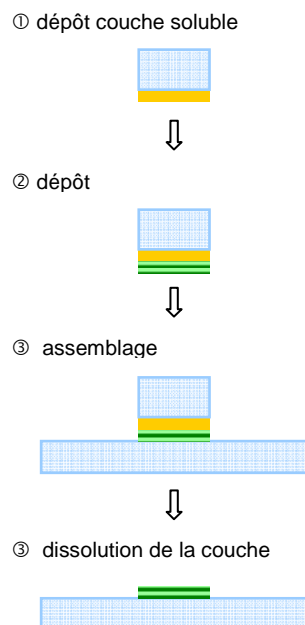


Figure 122 : Principe de transfert d'empilement par couche soluble.

Ce procédé de transfert est notamment utilisé dans des domaines d'application tels que la microélectronique [50]-[52]. Il peut alors s'agir de transférer des couches semiconductrices, ou des éléments plus complexes d'un substrat donneur vers un substrat cible. Ces opérations de transfert peuvent nécessiter l'utilisation d'un troisième substrat, une des deux étapes de séparation étant alors généralement réalisée au moyen d'une colle dégradable par action d'un solvant ou sous rayonnement UV [51].

I.3. Intégration de ce procédé dans la réalisation de filtres allumettes

Le principal intérêt de ce procédé de transfert pour notre application est qu'il peut être vu comme un procédé de structuration, permettant en plus de dissocier les risques de mise en forme et de dépôt des filtres par réalisation de ces étapes sur des substrats provisoires.

I.3.1. Structuration d'empilement par procédé de transfert

Le procédé de transfert offre donc l'avantage de permettre une structuration de l'empilement. En effet, on peut choisir un substrat provisoire possédant les dimensions finales auxquelles doit répondre l'empilement. Ainsi, par transfert sur le substrat définitif, on obtient directement la mise en forme de l'empilement, comme c'est le cas sur l'exemple de la Figure 122. Selon la géométrie désirée pour l'empilement, le substrat provisoire peut être lui-même structuré afin de faciliter sa manipulation tout en permettant la structuration de l'empilement. Il peut être également envisagé de mettre en forme l'empilement sur son substrat provisoire, avant l'étape de séparation, par les procédés classiques de photolithographie ou de découpe laser.

Par ce procédé donc, les risques encourus lors de l'étape de structuration ne pèsent que sur le substrat provisoire, il en est de même avec les risques inhérents à l'étape de dépôt. Ainsi, ce procédé apparaît particulièrement intéressant pour la réalisation de composants filtres allumettes, chacune des bandes pouvant être alors réalisée de manière indépendante, et transférée en dernière étape sur un substrat commun.

I.3.2. Architecture envisagée

Le principe de fabrication de filtres allumettes par technologie de transfert repose sur la même idée que par technologie d'assemblage : réaliser de manière indépendante l'ensemble des fonctions optiques afin d'éviter le cumul des risques inhérents à chacune des étapes de fabrication. En effet, comme il a été présenté précédemment, si l'on veut pouvoir augmenter le nombre de bandes spectrales par composant, il est nécessaire de rendre le rendement de fabrication indépendant du nombre de bandes, en d'autres termes les différentes bandes doivent être réalisés en parallèle afin de dissocier les risques associés à chacune d'entre elles.

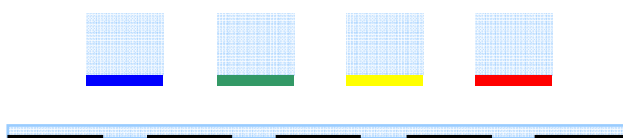
Comme dans le cas du procédé de fabrication par technologie d'assemblage, les différents traitements sont déposés et structurés sur des substrats indépendants. La différence réside dans le fait qu'au lieu de venir assembler tous ces substrats, seuls les empilements sont reportés sur composant final. Ainsi l'épaisseur totale de substrat est fortement réduite, ce qui permet, par une diminution du nombre d'interfaces, de minimiser la lumière parasite dans le système. De plus, l'architecture du composant s'en trouve simplifiée, puisqu'elle ne comporte qu'un seul substrat, ce qui lui garantit une meilleure stabilité mécanique vis-à-vis de contraintes de type chocs ou vibrations.

Cependant, on se retrouve dans une configuration de substrat unique, commun à toutes les bandes spectrales. Il n'est donc plus envisageable d'utiliser des substrats adaptés à chacune des voies, que ce soit en termes de nature (substrats absorbants de type verre coloré), ou d'épaisseur. De plus, la fonction optique doit à nouveau être réalisée sur une seule interface.

Par ce procédé de transfert, on perd donc les avantages qu'offrait la technologie d'assemblage en termes d'implication du substrat dans la fonction optique.

Le procédé de fabrication par technologie de transfert peut donc se résumer en deux étapes principales : tout d'abord, la réalisation et la structuration de chacune des fonctions optiques sur un substrat indépendant, puis le transfert des filtres directement sur la fenêtre portant la fonction absorbeur (Figure 123). Selon les spécifications demandées, il pourra être nécessaire d'avoir recours à une seconde fenêtre absorbeur, qui viendra alors se placer sur l'autre face du composant par technologie d'assemblage.

① Réalisation indépendante des différents traitements (filtres, absorbeur...)



② Transfert des filtres sur la fenêtre



Figure 123 : Principe de fabrication d'un composant filtres allumettes par technologie de transfert.

Dans une telle démarche, il convient de porter une attention particulière à l'action du solvant sur le traitement absorbeur. En effet, bien que celui-ci ne soit pas transféré, il est quand même soumis à l'action du solvant lors du transfert des filtres. Les traitements absorbeurs étant de plus constitués de couches métalliques, le risque de gravure de celles-ci apparaît important, voire inévitable dans le cas d'une couche soluble métallique. Une protection du traitement absorbeur s'impose alors, au moyen par exemple d'une couche de résine venant recouvrir toute la face arrière du composant. En effet la protection aux attaques chimiques peut se réaliser par l'intermédiaire d'une résine adaptée, comme dans le cas de structuration par gravure humide, où les parties du traitement que l'on souhaite conserver sont protégées par une résine.

Afin de valider le procédé de transfert en vue de notre application, il convient d'en vérifier expérimentalement les étapes les plus critiques, à savoir la séparation et l'assemblage.

II. Séparation de l'empilement

On choisit de ne tester que la séparation par couche soluble, la configuration en substrat soluble nous apparaissant plus difficile à mettre en œuvre.

II.1. Par couche de cryolite

Les matériaux hydrosolubles présentent l'avantage de se dissoudre dans le plus commun des solvants : l'eau. En plus d'une mise en œuvre particulièrement aisée, ils garantissent ainsi la non-dégradation des empilements, que ce soit le filtre à transférer ou le traitement absorbeur. En effet, dans ce cas, on pourrait alors s'affranchir de l'étape de protection de l'absorbeur lors de la séparation et ainsi des risques associés.

Parmi les matériaux connus dans le domaine des couches minces, la cryolite apparaît comme particulièrement intéressante. Ce fluorure de formule Na_3AlF_6 était surtout utilisé pour des traitements de type antireflet du fait de son bas indice de réfraction compris 1,27 entre et 1,34 en fonction du procédé de dépôt [53]. Cependant comme les couches de cryolite résistent mal à l'humidité et sont de ce fait mécaniquement faibles, elles ont été progressivement remplacées par d'autres matériaux de bas indice, par exemple par des couches de MgF_2 dans le cas des antireflets monocouches. Cette faible résistance à l'humidité des couches minces de cryolite peut être perçue comme un atout pour notre application. Afin de le confirmer, des tests de séparation par couche de cryolite ont donc été réalisés.

Dans un premier temps, une monocouche de silice est déposée par pulvérisation cathodique sur une couche de cryolite, engendrant l'encapsulation de cette couche par l'absence de listel. Dès l'immersion du composant dans de l'eau désionisée, on observe un « relief » de la couche de silice à l'endroit où celle-ci recouvre la cryolite. Après 1 h d'immersion, la cryolite a entièrement disparue, et la couche de silice, retenue au niveau de la couronne, se déchire au centre (Figure 124).

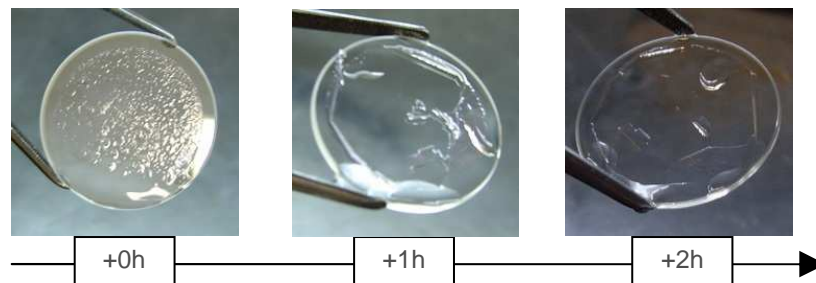


Figure 124 : Chronologie de la séparation d'une monocouche de silice déposée sur une couche de cryolite.

Puis, en vue de valider la séparation d'un empilement multicouche dense, des essais de dépôt d'empilements en technologie DIBS ont été réalisés sur des monocouches de cryolite. Cependant celles-ci, choisies justement pour leur faible tenue mécanique, ne supportent pas le dépôt d'un multicouche réalisé en technologie DIBS; la couche de cryolite cède avant même la fin du dépôt (Figure 125).



Figure 125 : Substrats traités avec une monocouche de Na_3AlF_6 à la sortie du bâti de dépôt DIBS.

Ce problème ainsi mis en avant est réhibitoire pour notre procédé, et nous contraint à abandonner le choix de la cryolite. On décide alors de se tourner plutôt vers des couches métalliques.

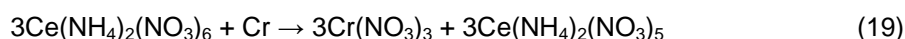
II.2. Par couche de chrome

Le chrome est fréquemment utilisé dans le domaine des couches minces comme couche d'accroche pour des matériaux de type aluminium ou bien encore argent, mais également dans la composition d'empilements de type métal / diélectrique, ce qui nous garantit sa bonne tenue mécanique.

II.2.1. Action du solvant

Le chrome peut être attaqué selon différentes réactions chimiques. Par exemple, des solvants de type perchlorure de fer ou acide nitrique sont fréquemment utilisés comme agent de gravure humide du chrome. Dans notre cas, on choisira une solution commerciale de nitrate d'ammonium cérique.

D'un point de vue chimique, le nitrate d'ammonium cérique est un oxydant puissant de formule $(\text{NH}_4)_2[\text{Ce}(\text{NO}_3)_6]$. Il attaque le chrome selon l'équation suivante :



Le degré d'oxydation du cérium est alors réduit de (IV) à (III), alors que celui du chrome est quant à lui augmenté de (II) à (III). Le nitrate de chrome $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ ainsi produit est dissout dans le solvant du fait de sa solubilité dans l'eau

L'action de ce solvant sur un empilement type a été testée expérimentalement afin de s'assurer que celui-ci ne dégrade pas les performances optiques du multicouche constitutif du filtre. Ainsi un empilement $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ réalisé en technologie DIBS a été immergé environ 46 h à température ambiante dans une solution de nitrate d'ammonium cérique.

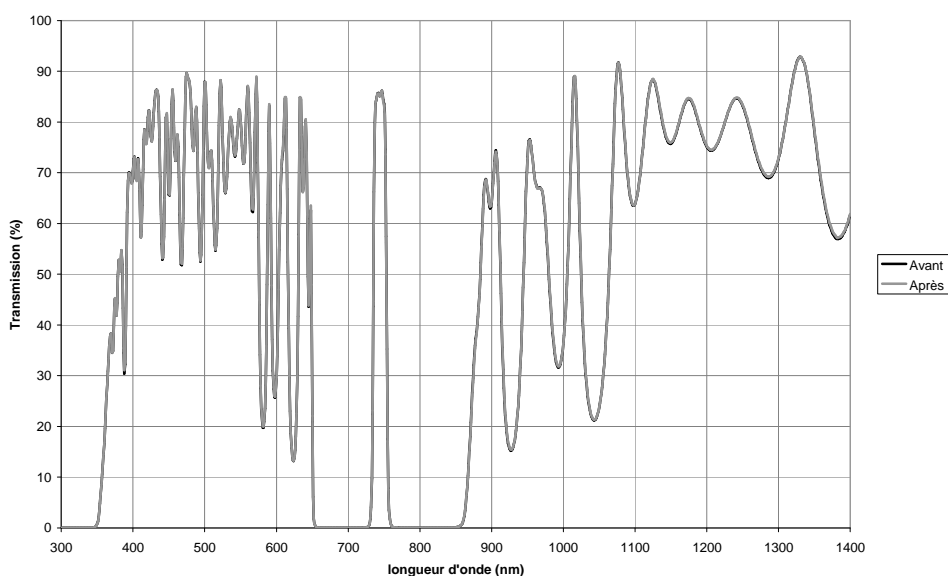


Figure 126 : Comparaison entre les mesures de transmission réalisées avant et après 46 h d'immersion dans la solution de nitrate d'ammonium cérique.

La comparaison de mesures de transmission effectuées avant et après l'immersion ne montre aucune variation du profil spectral de l'échantillon (Figure 126).

II.2.2. Tests de séparation sur des substrats témoins

On cherche ici à réaliser la séparation d'une monocouche, puis d'un empilement, par gravure d'une sous-couche de chrome dans du nitrate d'ammonium cérique.

Tout d'abord, est réalisé un composant constitué d'une monocouche de chrome sur laquelle a été déposée par pulvérisation cathodique une monocouche de silice. Afin d'éviter l'encapsulation de la couche de chrome, le dépôt de silice s'est effectué au travers d'un masque mécanique de diamètre inférieur.

Le composant ainsi réalisé est immergé, à température ambiante, dans la solution de nitrate d'ammonium cérique. Dès l'immersion, on observe la gravure de la zone de chrome non recouverte en quelques minutes seulement. Puis après quelques heures, un défaut sur la surface est mis en avant ; à cet endroit, le chrome est gravé rapidement. En dehors de cette zone, apparaissent de nombreux petits points de gravure répartis de manière quasiment uniforme sur toute la surface, provenant manifestement de la porosité de la couche de SiO_2 (Figure 127).

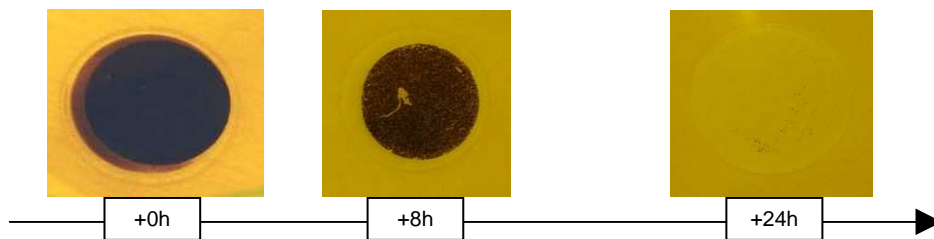


Figure 127 : Chronologie de la séparation d'une monocouche de silice par gravure d'une couche de chrome.

On constate alors que le phénomène d'attaque à travers la couche est plus rapide que celui d'attaque par la tranche. Le temps d'immersion nécessaire pour graver entièrement le chrome est alors d'environ 28 h.

On cherche ensuite à décoller un empilement réalisé en technologie DIBS. Le dépôt de cet empilement, constitué d'une dizaine de couches alternées $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$, est réalisé sur toute la surface du composant, encapsulant alors la couche de chrome. Afin d'initier la gravure, on réalise des incisions dans le traitement à l'aide d'une pointe diamant pour permettre au solvant d'attaquer le chrome.

Le composant est immergé à température ambiante dans la solution de nitrate d'ammonium cérique. On observe alors, après quelques heures d'immersion, une gravure du chrome à la fois par les incisions réalisées dans le traitement, mais également à travers l'empilement (Figure 128).

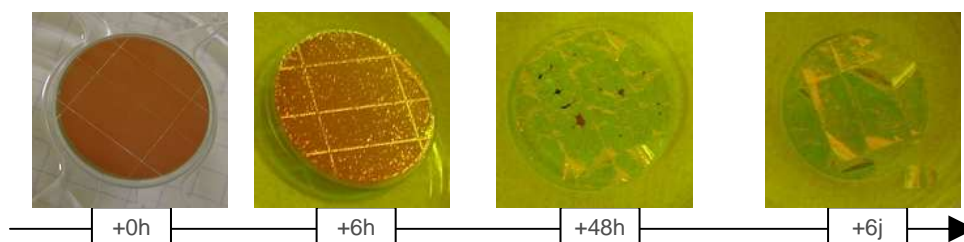


Figure 128 : Chronologie de la séparation d'un empilement DIBS par gravure d'une couche de chrome.

Le temps nécessaire pour graver la totalité de la couche de chrome est estimé à 6 jours environ. On observe alors que le traitement se détache sans paillettes et conserve une belle géométrie (Figure 129).

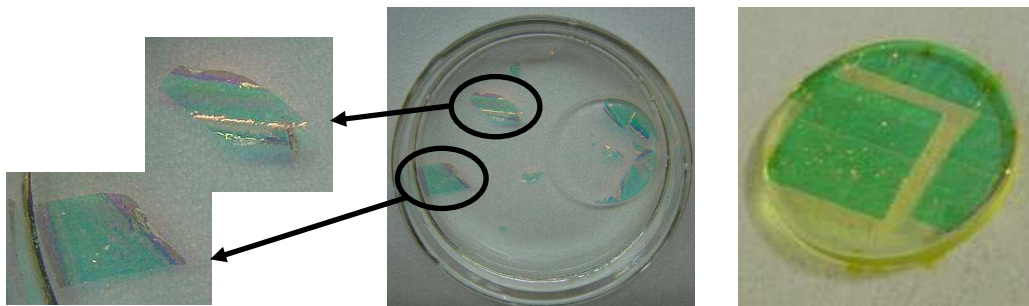


Figure 129 : Séparation d'un empilement DIBS par gravure d'une couche de chrome.

Les tests ainsi réalisés valident avec succès la séparation d'empilements par gravure d'une couche de chrome dans une solution de nitrate d'ammonium cérique. On notera toutefois une gravure de la couche à travers l'empilement, même dans le cas d'un empilement dense, et malgré cela, un temps de gravure relativement élevé.

II.3. Par couche d'aluminium

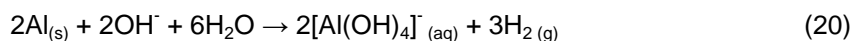
L'aluminium est un matériau connu dans le domaine des couches minces optiques. Il est notamment utilisé pour la réalisation de miroirs ou d'empilements métal / diélectrique.

II.3.1. Action du solvant

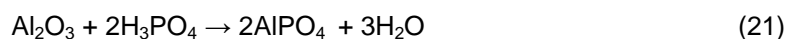
- Chimie de la réaction

La solubilité de l'aluminium dépend du pH de la solution dans lequel il est immergé [54]. Aux faibles pH, l'aluminium est présent presque totalement sous la forme de cations Al^{3+} . Puis, lorsque le pH augmente, il s'hydroxyde et sa solubilité devient alors minimale. En effet à pH neutre ou légèrement acide, la solubilité de l'aluminium peut être considérée comme nulle. Puis lorsque le pH croît encore, elle ré-augmente grâce à la formation de d'ions aluminate $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$. Il est donc envisageable de réaliser la gravure de l'aluminium à fort ou à faible pH, c'est-à-dire au moyen d'une solution basique ou acide.

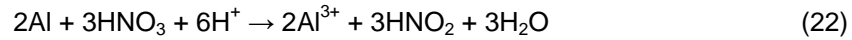
D'un point de vue chimique, l'action sur l'aluminium d'une base en solution aqueuse se traduit par la formation d'un précipité blanc et insoluble d'hydroxyde d'aluminium. Cette réaction produit un dégagement gazeux de dihydrogène. Si le pH de la solution est suffisamment élevé, l'hydroxyde d'aluminium s'oxyde alors en ions aluminate, incolores et solubles dans l'eau.



Cependant, les solutions commerciales de gravure d'aluminium sont généralement basées sur un mélange de plusieurs acides, contenant notamment de l'acide phosphorique et nitrique. Chimiquement, la gravure commence alors par l'attaque à l'acide phosphorique de la couche de passivation présente en surface afin de mettre l'aluminium « à nu ». Cette réaction est de type acido-basique et peut s'écrire de la manière suivante :



Une fois l'alumine dissoute, l'aluminium est attaqué par l'acide nitrique selon l'équation d'oxydoréduction suivante :



L'aluminium est alors présent sous forme ionique avec une solubilité maximale.

Des tests de dissolution d'aluminium ont été réalisés en milieu basique et acide, ainsi que des tests sur des empilements type, afin de s'assurer de l'action du solvant à la fois sur la couche soluble et sur un empilement multicouche.

- Observations expérimentales en milieu basique

Deux solutions alcalines ont été testées: une solution d'hydroxyde de sodium de concentration molaire d'environ 4 mol/L, et un mélange à base d'hydroxyde de potassium, éthanol et eau, de concentration molaire équivalente d'environ 2 mol/L. Lorsqu'on immerge de l'aluminium, on observe, dans chacun des cas, un dégagement gazeux dès l'immersion et une dissolution complète de l'aluminium. Le temps nécessaire à cette dissolution est, du fait du rapport de concentration, plus long dans le mélange KOH que dans la solution concentrée de NaOH.

Puis, afin de s'assurer que le solvant ne dégrade pas la fonction optique du filtre, un empilement alterné $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$ réalisé en technologie DIBS, est immergé dans la solution d'hydroxyde de sodium concentré. La comparaison des mesures spectrales effectuées avant et après immersion met en avant une action de la base sur l'empilement (Figure 130).

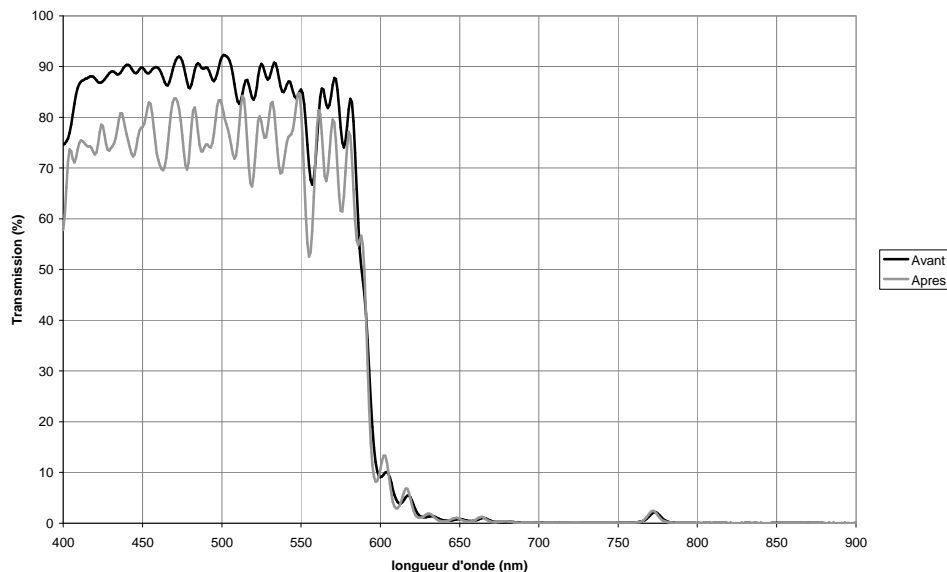


Figure 130 : Comparaison entre les mesures de transmission réalisées avant et après 44 h d'immersion dans la solution de NaOH concentré

Afin d'approfondir ce résultat, deux empilements DIBS, dont la dernière couche est dans le premier cas une couche de Ta_2O_5 et dans le second cas une couche de SiO_2 sont immergés dans le mélange basique KOH - éthanol - eau.

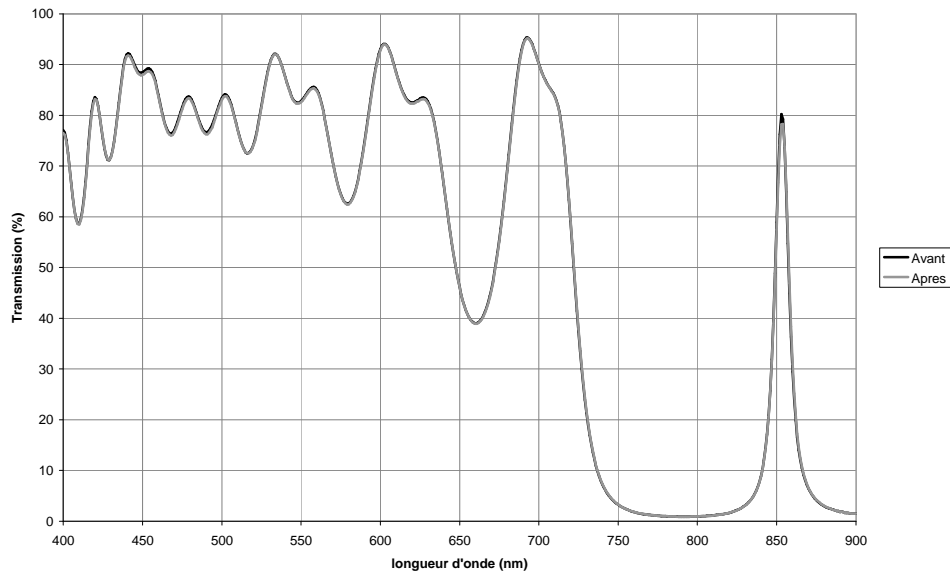


Figure 131 : Mesures de transmission de l'empilement dont la dernière couche est Ta₂O₅, réalisées avant et après 45 h d'immersion dans la solution basique (KOH).

La fonction optique de l'empilement dont la dernière couche est de Ta₂O₅ ne présente pas de variation après 45 h d'immersion en solution basique (Figure 131). A l'inverse, la fonction optique de l'empilement dont la dernière couche est SiO₂ est modifiée du fait de l'immersion en milieu basique (Figure 132).

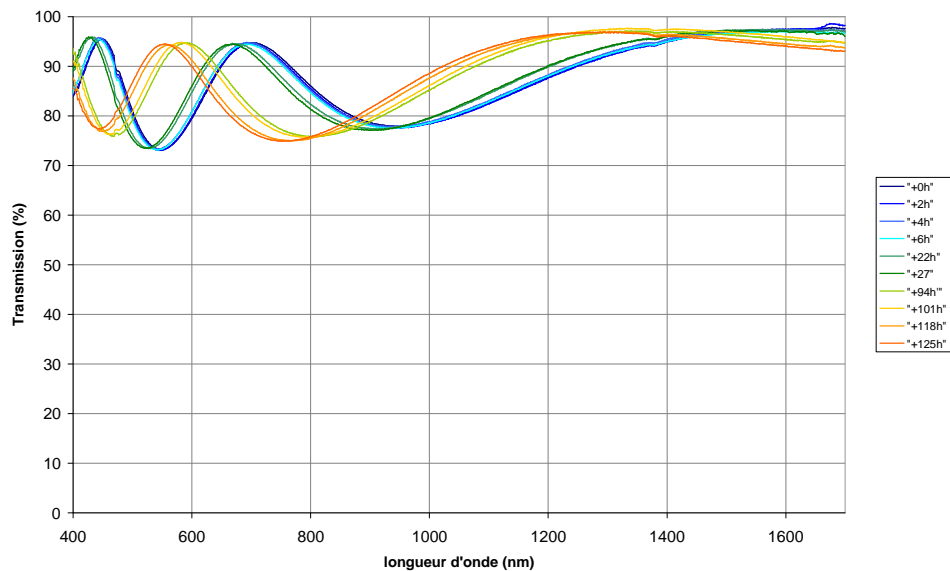


Figure 132 : Mesures de transmission de l'empilement dont la dernière couche est SiO₂, réalisées pour différents temps d'immersion dans la solution basique (KOH).

La variation observée sur ces dernières mesures de transmission nous laisse penser à un phénomène de gravure de la dernière couche de l'empilement, en silice, par les ions hydroxydes présents dans la solution. Le profil spectral théorique de cet échantillon est alors calculé pour différentes épaisseurs de la dernière couche. La comparaison de ces résultats de

simulation avec des mesures spectrales réalisées après différents temps d'immersion confirme cette hypothèse (Figure 133).

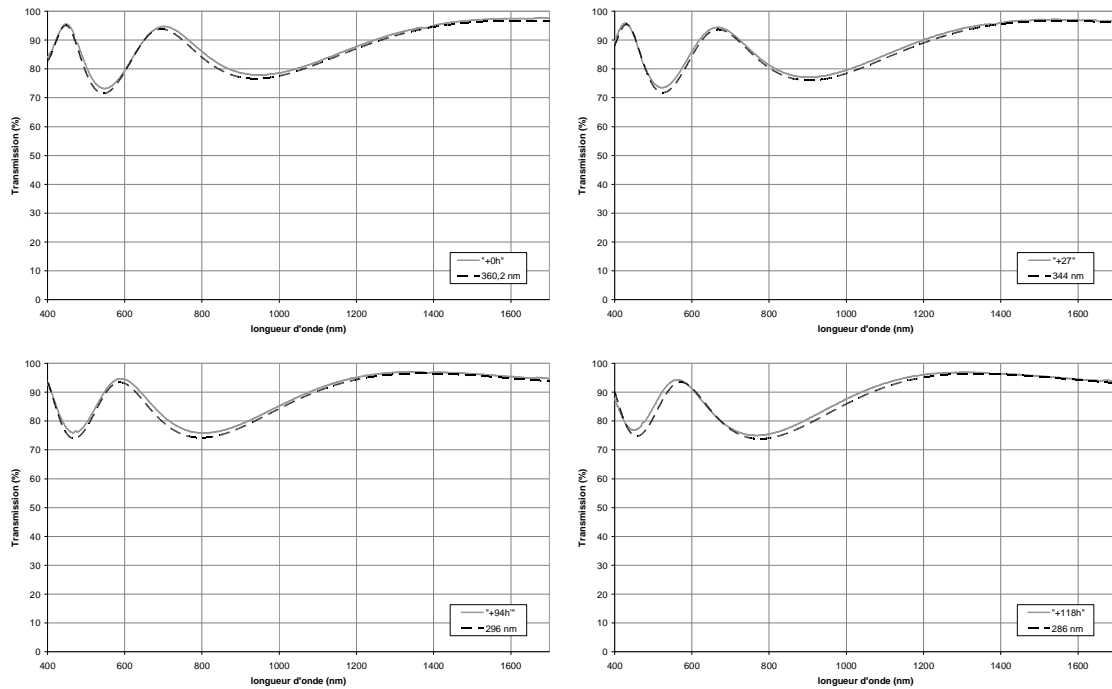
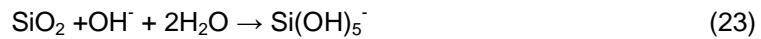


Figure 133 : Confrontation de résultats de simulations pour différentes épaisseur de la dernière couche (en traits discontinus) avec des mesures spectrales après différents temps d'immersion dans la solution basique (en traits pleins).

D'un point de vue chimique en effet, les ions hydroxydes réagissent avec la silice, selon l'équation suivante :



La vitesse de gravure de la couche de silice en surface est alors estimée à environ 0,6 nm/h dans notre cas (Figure 134). Cette valeur sera à comparer au taux de gravure de l'aluminium afin de déterminer si cet effet est négligeable ou rédhibitoire pour notre application.

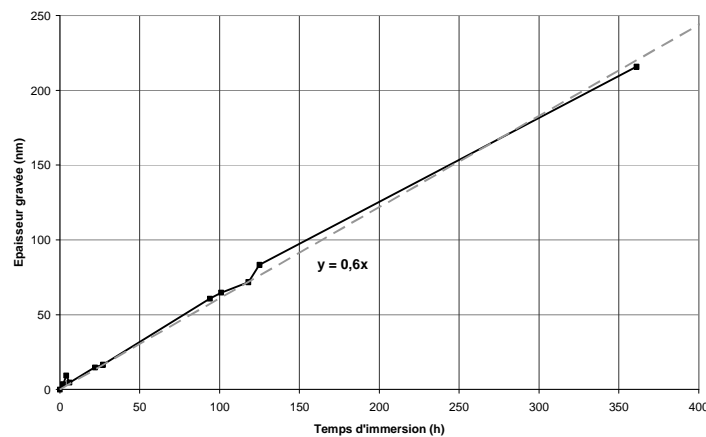


Figure 134 : Estimation de l'épaisseur gravée en fonction du temps d'immersion.

- Observations expérimentales en milieu acide

En milieu acide, la composition du solvant a été choisie proche de celles des solutions commerciales de gravure d'aluminium, à savoir un mélange d'acide phosphorique, nitrique, acétique et d'eau (dans les proportions suivantes, en volume, 7 H₃PO₄ : 0,2 HNO₃ : 1 CH₃COOH : 1,8 H₂O). Par immersion d'aluminium, on observe alors une dissolution complète dans un temps beaucoup plus important qu'en milieu basique, pour des conditions expérimentales similaires. En effet il faut environ 50 fois plus de temps dans notre solution acide qu'avec la solution d'hydroxyde de potassium.

Un empilement réalisé en technologie DIBS a été également immergé dans le mélange acide. Les mesures spectrales de cet empilement réalisées avant et après immersion ne montrent aucune variation du spectre de transmission du composant (Figure 135).

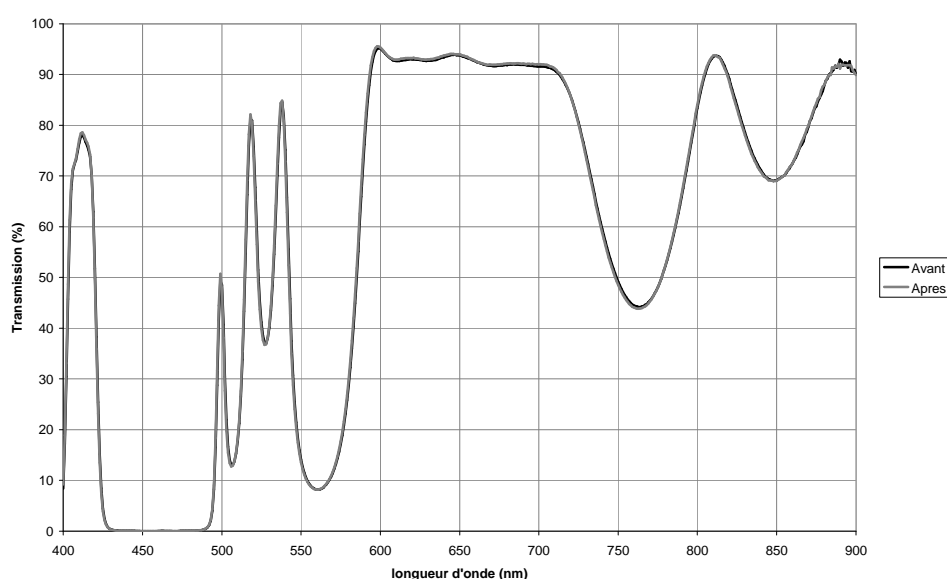


Figure 135 : Comparaison entre les mesures de transmission réalisées avant et après 46h d'immersion dans le mélange d'acide.

La lenteur de la dissolution en milieu acide, ainsi que la complexité supplémentaire de mise en œuvre d'un solvant acide par rapport à un solvant basique, nous ont conduit à privilégier par la suite la solution d'hydroxyde de potassium, malgré la mise en avant, lors de ces premiers tests, d'une action des ions hydroxydes sur la silice.

II.3.2. Tests de séparation sur des substrats témoins

On cherche ici à réaliser la séparation d'une monocouche, puis d'un empilement, par gravure d'une couche d'aluminium dans un mélange basique de KOH, d'eau et d'éthanol.

Le premier composant que l'on immerge est constitué d'une monocouche d'aluminium sur laquelle a été déposée une couche de silice en pulvérisation cathodique au travers d'un masque mécanique, comme dans le cas du chrome. Dès l'immersion, on observe un dégagement gazeux au niveau de la zone d'aluminium non recouverte de SiO₂. Celle-ci est dissoute en quelques dizaines de minutes. Puis, après quelques heures d'immersion, on constate l'apparition sur toute la surface du composant de points d'attaque, provenant là aussi de la porosité de la couche de silice (Figure 136).

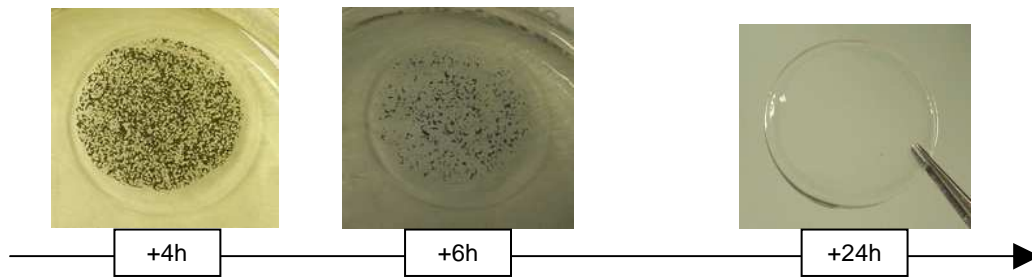


Figure 136 : Chronologie de la séparation d'une monocouche de silice par gravure d'une couche d'aluminium.

Comme dans le cas du chrome, le phénomène de gravure de l'aluminium au travers de la couche de silice est prépondérant par rapport à la gravure par la tranche. Après 8 h d'immersion, l'aluminium est, à l'œil, entièrement gravé. La monocouche de silice se détache alors du substrat lors du retrait du composant de la solution (Figure 137).

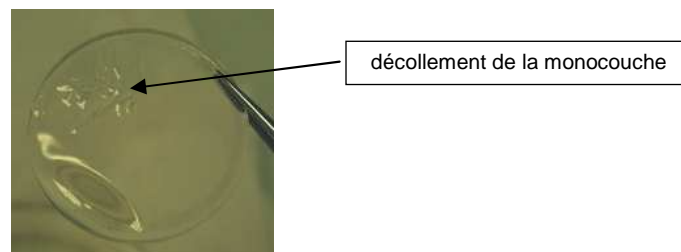


Figure 137 : Mise en évidence de la monocouche de silice décollée par gravure d'aluminium.

Puis on réalise la même démarche avec un empilement d'une dizaine de couches alternées Ta_2O_5 / SiO_2 , réalisé en technologie DIBS. La zone de traitement de l'empilement étant plus importante que celle de l'aluminium, on réalise alors une incision dans le traitement à l'aide d'une pointe diamant afin d'initier la gravure.

Le composant est immergé, à température ambiante, dans le mélange basique KOH. Quelques heures d'immersion suffisent à mettre en avant les différentes zones d'amorce de la gravure : par l'incision, le listel et le traitement (Figure 138).

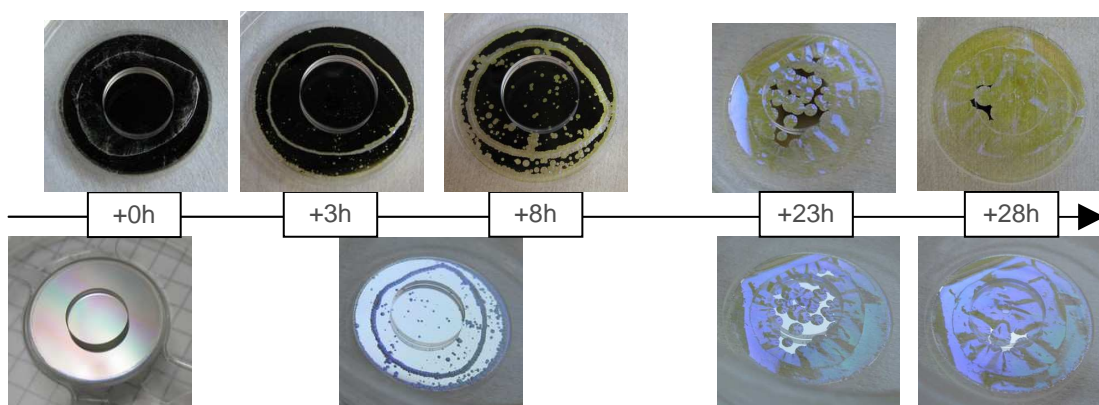


Figure 138 : Chronologie de la séparation d'un empilement DIBS par gravure d'une couche d'aluminium.

En effet, là encore, on voit apparaître des points d'attaque de l'aluminium à travers l'empilement DIBS. Ces points, dont le nombre semble a priori constant, mettent en avant l'aspect isotrope de la gravure. Bien que la gravure par l'incision à la pointe diamant soit prépondérante, la contribution de l'attaque à travers le traitement reste encore importante.

Après 32 h d'immersion, l'aluminium est entièrement gravé, l'empilement DIBS se détache alors du substrat (Figure 139).

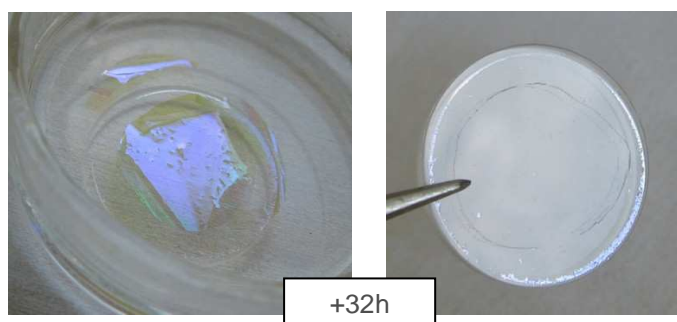


Figure 139 : Séparation d'un empilement DIBS par gravure d'une couche d'aluminium après 32 h d'immersion dans la solution KOH.

Ainsi par ces tests, la séparation d'un empilement par gravure d'une couche d'aluminium en milieu alcalin est validée. On notera que comme précédemment, le phénomène de gravure à travers l'empilement reste important, malgré le choix d'une technologie particulièrement dense pour le dépôt de ces couches. De plus, le temps nécessaire est dans le cas de l'aluminium beaucoup plus faible que dans celui du chrome.

II.4. Bilan de l'étape de séparation

Ces tests expérimentaux ont permis de valider la séparation d'empilements denses au moyen d'une couche sacrificielle en aluminium et en chrome. En effet, la cryolite possède une tenue mécanique trop faible pour supporter le dépôt d'un empilement dense ce qui est rédhibitoire pour notre application.

Dans le cas de l'aluminium et du chrome, l'immersion des composants a mis en avant une certaine porosité des empilements, d'une dizaine de couches, pourtant réalisé en technologie DIBS, particulièrement dense. En effet, il a été remarqué que la gravure s'effectue, dans les deux cas, en partie à travers l'empilement.

Du fait de l'utilisation d'une solution de gravure commerciale, optimisée pour réaliser des motifs avec précision, la vitesse de gravure est, dans le cas du chrome, inférieure à celle de l'aluminium en milieu basique. Cependant, le temps nécessaire reste tout à fait raisonnable et le chrome apparaît alors à l'issue de ces tests être un candidat particulièrement intéressant pour notre application. L'aluminium, quant à lui, a donné également de bons résultats, malgré la mise en évidence dans ces tests préliminaires d'une action des ions hydroxydes sur la silice. Cependant une estimation de ce taux de gravure montre que celui-ci est particulièrement faible face à celui de la gravure de l'aluminium. On gardera toutefois à l'esprit la solution alternative que représentent les solvants acides.

III. Assemblage

III.1. Solutions proposées

III.1.1. Identification des besoins

L'étape d'assemblage permet de fixer l'empilement du filtre à transférer sur le substrat définitif. Le procédé d'assemblage retenu devra donc pouvoir créer un lien entre un substrat de silice et un empilement multicouche, sachant que les matériaux utilisés pour réaliser le traitement sont SiO_2 et Ta_2O_5 . Optiquement, le joint étant situé sur le chemin optique, il devra donc être transparent. On recherche dans notre cas, une bonne transmission dans les domaines du visible et proche infrarouge. Chimiquement, l'étape d'assemblage étant, dans notre procédé, située avant l'étape de séparation, le lien créé devra être stable et résistant, notamment face aux solvants retenus pour la dissolution de la couche soluble. Mécaniquement, la géométrie du système mais surtout la faible épaisseur de l'élément à assembler impose un joint robuste ayant lui-même une faible épaisseur. Enfin il conviendra de s'assurer que le procédé d'assemblage choisi est qualifié pour les applications spatiales.

Parmi les technologies d'assemblages déjà étudiées précédemment, deux sont identifiées comme pouvant être adaptées à notre application. Il s'agit de l'adhérence moléculaire et de l'assemblage catalysé par hydroxyde. On notera qu'il doit probablement exister des colles répondant à nos besoins, mais cette piste n'a pas été privilégiée dans notre étude.

III.1.2. Validation des procédés retenus

L'adhérence moléculaire répond à tous ces critères, et apparaît, par l'absence de joint, comme le procédé d'assemblage le mieux adapté à notre application. Cependant, face à l'immersion, l'adhérence peut présenter quelques faiblesses dès lors que le lien n'est pas parfaitement établi sur l'ensemble de la surface. En effet, il suffit d'une petite zone non adhérente pour que le solvant s'infiltre et migre à l'interface, rompant ainsi le lien. Les listels des traitements devront donc faire l'objet d'une attention particulière, puisqu'ils apparaissent comme une zone délicate pour l'adhérence moléculaire.

L'assemblage par hydratation / déshydratation catalysée par hydroxyde semble également répondre à l'ensemble des critères. Cependant, la nature chimique du lien impose de valider l'action du solvant afin de garantir sa tenue lors de l'étape de séparation. Pour cela des tests d'immersion sont réalisés, sur des composants non traités assemblés à l'IGR de Glasgow par ce procédé. Il s'agit des composants présentés dans le chapitre II, où une allumette de silice est adhérente sur un substrat de silice.

Une observation visuelle au microscope optique réalisée avant et après 48 h d'immersion montre que le lien ne semble pas affecté par immersion dans le nitrate d'ammonium cérique (Figure 140). Cependant dans le cas du second composant, immergé dans la solution basique KOH, la comparaison d'observations au microscope optique avant et après 48 h d'immersion met en avant une dégradation du lien (Figure 141). Ce résultat s'explique par la nature chimique du lien, proche de la silice (chaines siloxanes), qui est donc sujet au même phénomène de gravure par les ions hydroxydes. Une comparaison des temps nécessaires pour graver la couche d'aluminium et pour dégrader le lien d'assemblage devra permettre de voir si ce phénomène rend possible le transfert d'empilement assemblé selon ce procédé par gravure d'une couche d'aluminium en milieu basique.

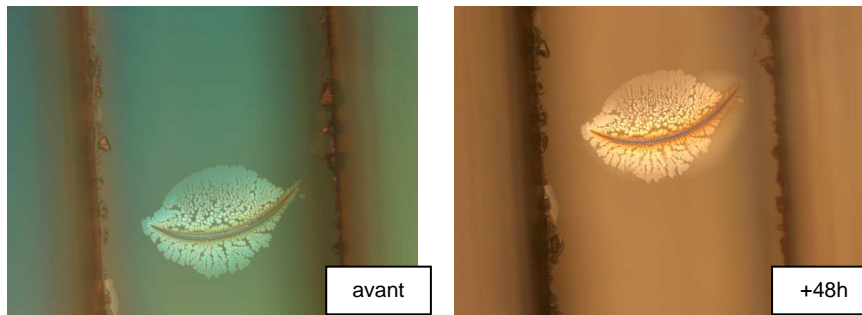


Figure 140 : Observation au microscope optique autour d'un défaut d'un lien d'assemblage catalysé par hydroxyde avant et après 48 h d'immersion dans du nitrate d'ammonium cérique.

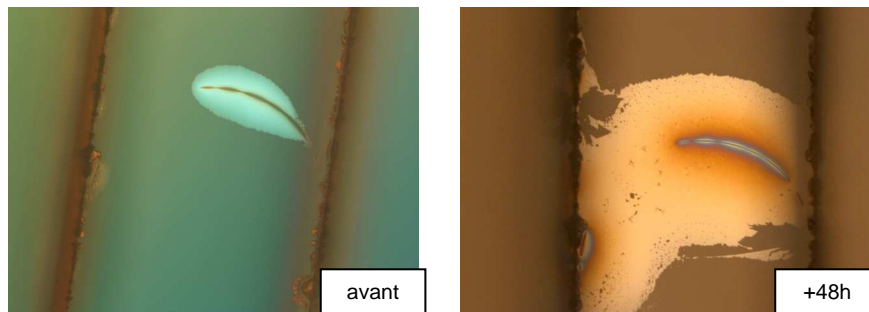


Figure 141 : Mise en avant de l'action des ions hydroxydes sur le lien d'assemblage catalysé par hydroxyde par observation microscope autour d'un défaut.

III.2. Déformations dues aux contraintes dans les empilements

Les deux procédés d'assemblage retenus requièrent des conditions relativement strictes sur la planéité des substrats. Or, le dépôt des couches minces engendre des contraintes qui provoquent une déformation des composants. Il conviendra alors, par un calcul théorique puis au travers de mesures, de vérifier que les déformations induites par les dépôts restent compatibles avec les exigences des procédés d'adhérence moléculaire et d'assemblage catalysé par hydroxyde.

III.2.1. Formule de Stoney

Dans son article publié en 1909, Stoney présente l'expression de la courbure d'une poutre d'acier due au dépôt, sur une de ses faces, d'une couche métallique [55]-[56]. Cette expression est obtenue à partir des conditions d'équilibre du système, à savoir une somme des forces et des moments nulles, et en faisant l'hypothèse que l'épaisseur du traitement est très inférieure à l'épaisseur du substrat. Pour des conditions de contraintes biaxiales, elle peut alors s'écrire de la manière suivante :

$$\sigma_f = \frac{E_s d_s^2}{6R(1-\nu)d_f} \quad (24)$$

où σ_f est la contrainte dans la couche, E_s et ν sont respectivement le module d'Young et le coefficient de Poisson du substrat, d_s l'épaisseur de ce substrat, d_f celle de la couche, et R le rayon de courbure de l'ensemble.

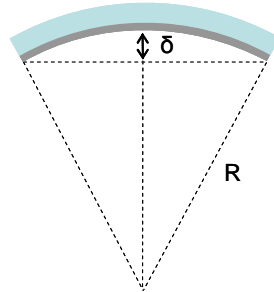


Figure 142 : Définition de la flèche au centre dans le cas d'une poutre.

Dans notre cas, le substrat est une poutre de longueur l , et l'expression de la flèche au centre due à la contrainte de la couche peut alors s'écrire :

$$\delta = \frac{l^2}{8R} \quad (25)$$

Ces formules vont nous permettre dans la suite de déterminer un ordre de grandeur des déformations des substrats induites par le dépôt des couches minces.

III.2.2. Cas d'une couche métallique déposée par évaporation

Pour notre application, le substrat est tout d'abord traité avec une couche métallique, de chrome ou d'aluminium, déposée par évaporation.

Considérons donc une couche de chrome, d'épaisseur mécanique d'environ 20 nm, déposée par évaporation sur une allumette de silice d'épaisseur 3 mm et de longueur 20 mm, et déterminons numériquement la flèche au centre de l'allumette. Selon Ohring [57], la contrainte d'une couche de chrome déposée par évaporation est de l'ordre de 0,85 GPa. En appliquant alors la formule précédente, on obtient une flèche au centre de l'allumette de l'ordre de 6 nm. Cette valeur correspond uniquement à la déformation induite par la couche de chrome, on ne tient pas compte ici de la planéité initiale du substrat.

Si on réalise maintenant une mesure de cette déformation, par l'analyse tridimensionnelle du substrat traité au moyen d'un profilomètre optique ZYGO NewView 7300, la flèche au centre alors mesurée est en accord avec la valeur théorique calculée, à savoir une dizaine de nanomètres environ (Figure 143).

La même démarche peut être appliquée dans le cas d'une couche d'aluminium. La déformation alors calculée est du même ordre de grandeur, soit de quelques nanomètres environ. En effet, bien que l'on ait déposé une couche d'aluminium d'épaisseur environ 10 fois supérieure à celle du chrome, la contrainte de l'aluminium déposé par évaporation est estimée de l'ordre de 0,074 GPa, soit environ 10 fois inférieure à celle du chrome [57].

La rugosité étant également un paramètre important pour les procédés d'assemblage, on s'assurera de la même manière que le dépôt métallique par évaporation n'engendre pas de détérioration de l'état de surface des allumettes. Des mesures locales ont donc été effectuées

sur les allumettes précédentes, donnant une rugosité rms mesurée du même ordre de grandeur pour les deux matériaux que pour un substrat nu, inférieure au nanomètre (Figure 144).

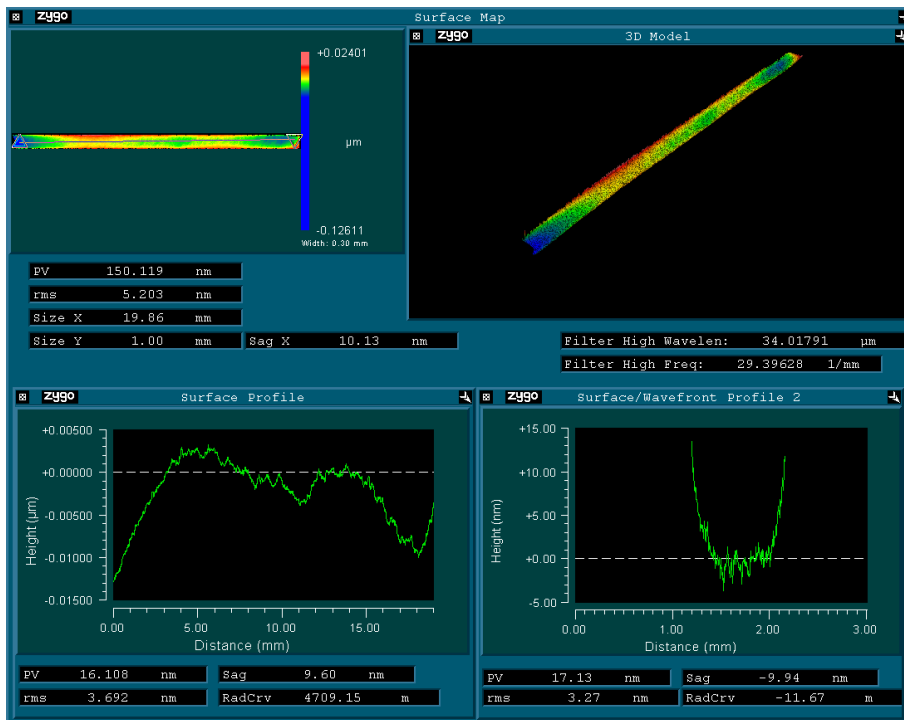


Figure 143 : Mesure de la planéité d'une allumette de silice d'épaisseur 3 mm, de longueur 20 mm, après le dépôt d'une couche de chrome par évaporation.

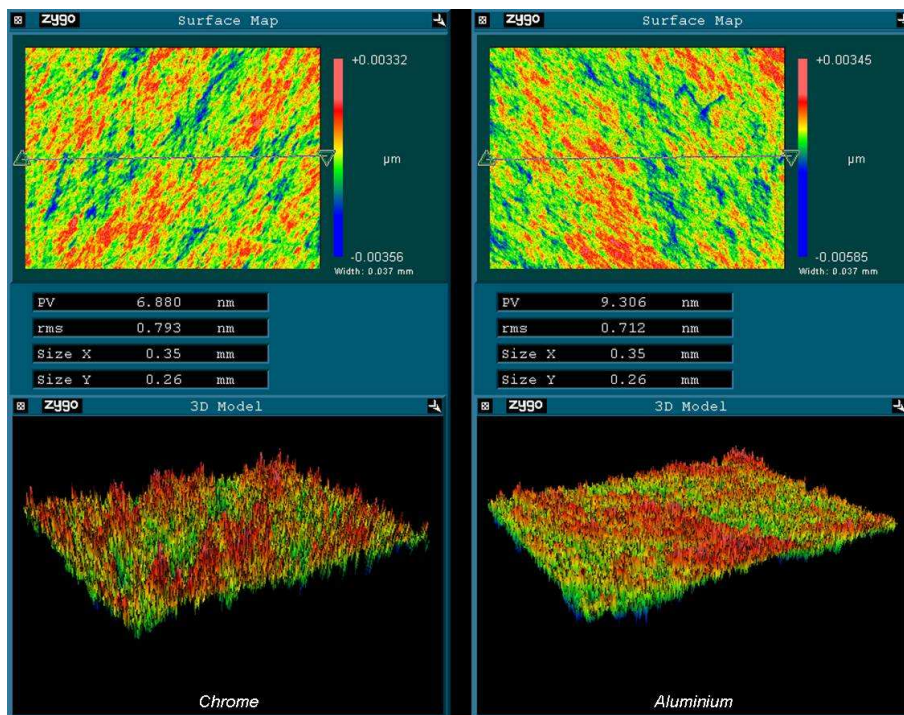


Figure 144 : Mesures locales de rugosité d'allumettes après le dépôt par évaporation d'une couche de chrome (à droite) et d'aluminium (à gauche).

En résumé, les déformations induites par les couches métalliques de séparation sont donc relativement faibles, ce qui minimise leur impact sur le procédé d'assemblage. Il convient maintenant d'évaluer de la même manière les déformations dues aux empilements multicouches déposés en technologie DIBS, beaucoup plus dense.

III.2.3. Cas d'empilements déposés par technologie DIBS

Des empilements multicouches sont donc déposés, en technologie DIBS, sur des substrats préalablement traités avec une couche métallique.

On se basera, pour les valeurs des contraintes dans les couches, sur des travaux effectués au laboratoire, déterminant ces contraintes pour des couches denses selon les technologies IP et IAD [58]. Pour ces deux technologies assistées, la contrainte a été mesurée aux environs de 0,45 GPa pour les deux matériaux concernés. On considèrera alors que l'empilement se comporte comme une monocouche d'épaisseur totale correspondant à celle du traitement et présentant une contrainte de 0,45 GPa.

Prenons l'exemple d'un substrat traité chrome sur lequel a été déposé en technologie DIBS un empilement dont l'épaisseur mécanique est d'environ 1,2 μm . Le calcul théorique nous donne alors une flèche au centre de l'allumette de l'ordre de 200 nm. De la même manière que précédemment on réalise également une mesure de forme de l'allumette à l'aide d'un profilomètre optique ZYGO NewView 7300, et la flèche au centre est alors mesurée à environ 170 nm (Figure 145). Là encore, on constate que l'ordre de grandeur de la mesure correspond à celui du calcul, la planéité initiale du substrat n'étant naturellement pas prise en compte dans le calcul théorique.

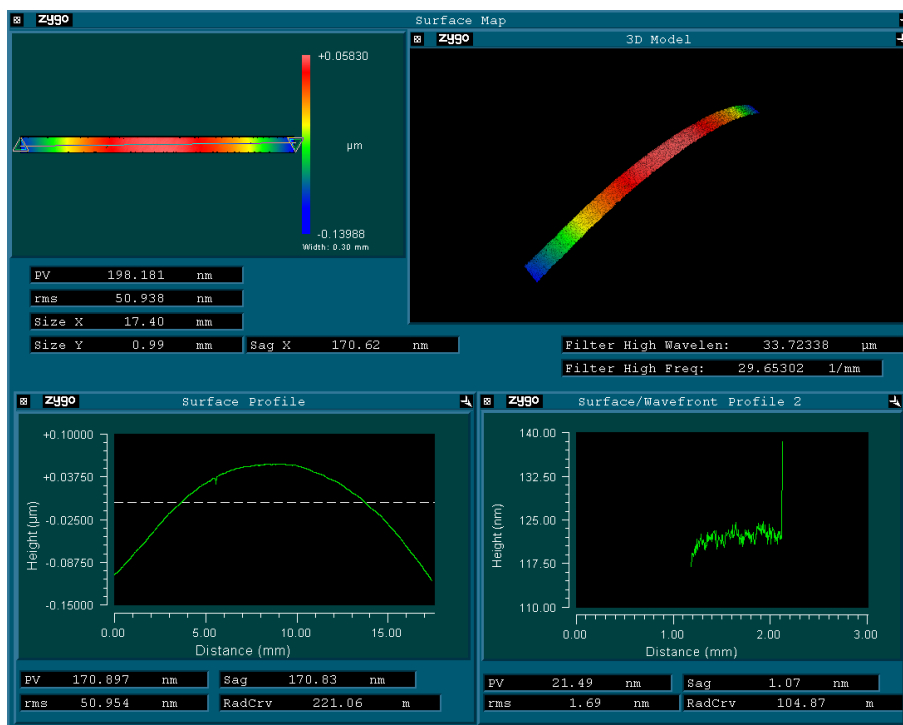


Figure 145 : Mesure de la planéité d'une allumette de silice d'épaisseur après le dépôt d'une couche de chrome par évaporation et d'un empilement en technologie DIBS.

Si l'on réalise alors la même démarche avec une allumette traitée aluminium sur laquelle a été déposé un empilement en technologie DIBS, d'épaisseur mécanique d'environ 1,9 μm , le calcul

aboutit à une flèche au centre de l'allumette de l'ordre de 310 nm, la mesure donnant quant à elle un résultat de 277 nm (Figure 146).

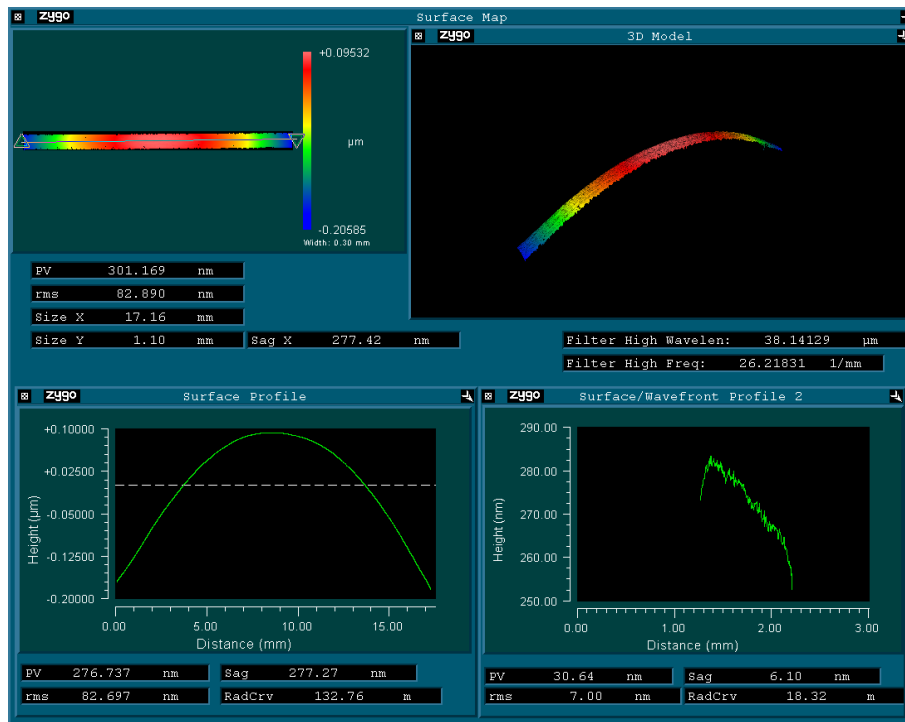


Figure 146 : Mesure de la planéité d'une allumette de silice d'épaisseur après le dépôt d'une couche d'aluminium par évaporation et d'un empilement en technologie DIBS.

En résumé, on constate une bonne adéquation des ordres de grandeur entre les valeurs théoriques et mesurées des flèches au centre. Ces déformations apparaissent cependant comme relativement importantes puisqu'elles peuvent atteindre plusieurs centaines de nanomètres au centre de l'allumette pour un dépôt de seulement 1 à 2 µm, ce qui correspond à une dizaine de couches. Les fonctions optiques des filtres allumettes comportant typiquement plus d'une centaine de couches, les déformations pourraient alors atteindre des valeurs supérieures au micron.

On notera que la technologie de dépôt DIBS, par l'aspect particulièrement dense de ses couches, ne modifie pas la rugosité du composant. Ceci a notamment été confirmé par des mesures locales sur ces mêmes allumettes donnant une rugosité rms du même ordre de grandeur que dans le cas du dépôt métallique, à savoir inférieure au nanomètre.

III.3. Bilan de l'étape d'assemblage

Pour réaliser l'étape d'assemblage, deux procédés ont été retenus: l'adhérence moléculaire et l'assemblage par hydratation / déshydratation catalysé par hydroxyde. Cependant, comme il vient d'être vu, les déformations des substrats induites par les dépôts d'empilements sont de l'ordre de plusieurs centaines de nanomètres de flèche au centre de l'allumette. Celles-ci sont donc trop importantes pour permettre un assemblage par adhérence moléculaire. En effet, même s'il est possible de réaliser l'adhérence sur une grande surface du substrat, le lien ainsi créé sera trop faible pour résister à l'étape d'immersion dans le bain de gravure. Le procédé d'assemblage catalysé par hydroxyde quant à lui offre une certaine flexibilité sur sa mise en œuvre. En effet, il est possible d'adapter la solution d'assemblage pour permettre la création du lien entre des surfaces présentant un défaut de planéité supérieur à celui acceptable avec le

procédé standard. Ainsi des tests d'assemblage ont été réalisés avec succès à l'IGR de Glasgow sur des allumettes traitées, avec une solution d'assemblage légèrement différente (Figure 147).

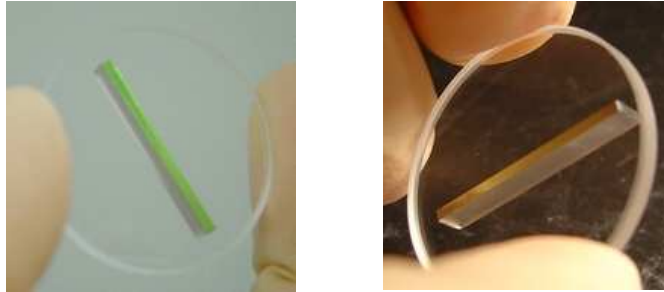


Figure 147 : Photographies d'une allumette traitée, de planéité 303 nm (PV), assemblée par hydratation /déshydratation catalysée par hydroxyde.

On notera cependant que l'on atteint ici les limites du procédé. Il est donc nécessaire de proposer des solutions permettant de limiter ces déformations, afin d'une part de pouvoir envisager l'assemblage avec des empilements plus épais, et d'autre part revenir en configuration standard pour le procédé catalysé par hydroxyde, voire permettre l'adhérence moléculaire.

Les déformations induites par les contraintes dans les couches étant cependant inévitables, il nous faudrait alors agir sur le substrat pour minimiser sa déformation. Si l'on reprend l'équation de Stoney, on constate tout d'abord que la déformation varie avec le carré de l'épaisseur de substrat. Il pourra donc être envisagé de choisir un substrat plus épais. Dans le cas de l'exemple présenté ci-dessus, l'allumette sur laquelle ont été déposés une couche de chrome et un empilement DIBS avait une épaisseur nominale de 3 mm. La flèche calculée pourrait être réduite de 200 à 70 nm en augmentant l'épaisseur du substrat de 3 à 5 mm. Cependant cette augmentation d'épaisseur n'est pas favorable à une manipulation aisée de l'allumette.

De plus, pour notre application, le substrat allumette est provisoire, sa nature n'a donc pas d'importance, à condition de garantir l'adhésion du traitement sur le substrat. Il peut donc être envisagé de diminuer la déformation en choisissant un substrat présentant des propriétés élastiques plus adaptés, c'est-à-dire un module de Young et un coefficient de Poisson plus élevé. On notera cependant les valeurs typiques pour les verres standards se situent entre 50 et 90 GPa pour le module d'Young, et entre 0,21 et 0,25 pour le coefficient de Poisson⁴. L'effet est de plus beaucoup moins important que la variation d'épaisseur. Par calcul numérique, la diminution de la flèche entre le cas d'un substrat de silice (de module d'Young 78 GPa et de coefficient de Poisson 0,17) et un substrat de BK7 (de module d'Young 82 GPa et de coefficient de Poisson 0,206) n'est de l'ordre que d'une vingtaine de nanomètres, toujours le cas de l'exemple présenté ci-dessus.

Enfin, puisque, comme il vient d'être dit, le substrat allumette est provisoire, il peut être également envisageable de compenser ces contraintes en déposant sur la face arrière du substrat, un empilement possédant les mêmes caractéristiques. En effet, dans ce cas, les contraintes induites sur les deux faces du substrat se compensent et la déformation de celui-ci est alors minimisée. Concrètement, il s'agit là de réaliser un dépôt de même contrainte, c'est-à-dire de même épaisseur mécanique, si les matériaux sont identiques, suivant la même technologie de dépôt. Il peut également être envisagé par exemple de réaliser une monocouche d'épaisseur adaptée. Cette solution a déjà été mise en œuvre avec succès au laboratoire, et apparaît alors comme la mieux adaptée à notre problème.

⁴ SCHOTT Technical Glasses - Physical and Technical Properties

IV. Transfert

Les étapes élémentaires du procédé que sont la séparation et l'assemblage étant expérimentalement validées, on cherche alors à réaliser le transfert d'un empilement multicouche.

IV.1. Configuration « aluminium »

Sur un substrat allumette est déposée tout d'abord une couche d'aluminium, puis un empilement d'une dizaine de couches de type passe bande réalisé en technologie DIBS. L'allumette ainsi traitée est ensuite assemblée sur un substrat circulaire par hydratation / déshydratation catalysée par hydroxyde à l'IGR de Glasgow (Figure 148).

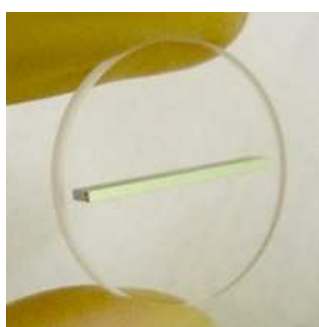


Figure 148 : Photographie du composant assemblé en configuration « aluminium ».

Ce composant est immergé dans le mélange basique KOH – eau – éthanol. L'attaque de l'aluminium ne pouvant se faire, dans une telle configuration, que par la tranche du traitement, le temps de gravure est alors relativement long malgré la faible surface d'aluminium à graver. Après 47 h environ, l'aluminium est entièrement gravé et le composant est retiré de son bain. Les deux substrats, allumette et circulaire, se séparent, cependant l'empilement n'est pas transféré dans son intégralité sur le substrat circulaire, puisqu'une partie reste sur l'allumette (Figure 149).

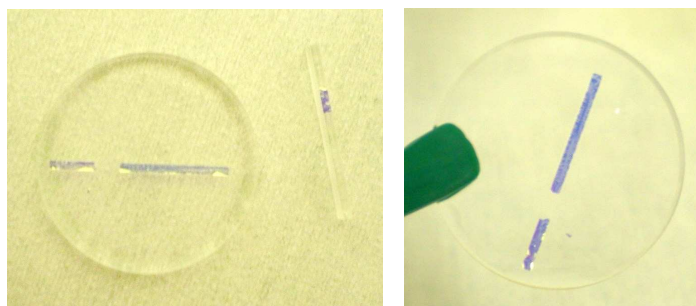


Figure 149 : Photographies du composant après gravure de la couche d'aluminium.

De plus, le nettoyage des substrats, nécessaire après cette étape de gravure, entraîne une dégradation du traitement, confirmée par une observation au microscope optique et par l'apparition de paillettes, mettant ainsi en avant la faiblesse de l'assemblage ainsi réalisé (Figure 150). Cette fragilité en milieu basique du lien d'assemblage obtenu par hydratation /

déshydratation catalysée par hydroxyde avait déjà été identifiée comme un point délicat lors de la validation expérimentale du procédé d'assemblage.



Figure 150 : Observation au microscope optique de l'empilement transféré sur le substrat circulaire après gravure de la couche d'aluminium.

Une optimisation du temps de gravure permettrait de limiter l'attaque du lien par les ions hydroxydes, sans pour autant parvenir à l'empêcher. Cette solution ne paraît donc pas suffisamment robuste pour permettre la réalisation de composants selon ce procédé de transfert par couche d'aluminium en milieu basique.

IV.2. Configuration « chrome »

La même démarche est alors appliquée au cas où l'on met en œuvre une couche sacrificielle de chrome. Le composant se constitue donc d'un substrat allumette sur lequel ont été déposés une couche de chrome, puis un empilement en technologie DIBS, assemblé sur un substrat circulaire par hydratation / déshydratation catalysée par hydroxyde (Figure 151).

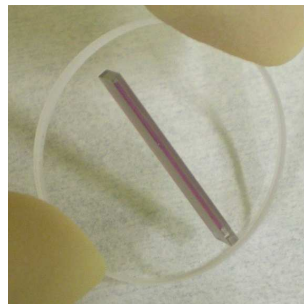


Figure 151 : Photographie du composant assemblé en configuration « chrome ».

Le composant ainsi réalisé est immergé dans la solution de nitrate d'ammonium cérique. Comme précédemment, du fait de la faible zone d'attaque, le temps d'immersion nécessaire à la gravure complète du chrome est relativement élevé. Après presque 130 h d'immersion, le chrome est entièrement gravé, et l'allumette se sépare du composant, le traitement restant quant à lui assemblé sur le substrat circulaire (Figure 152). L'empilement est alors transféré.

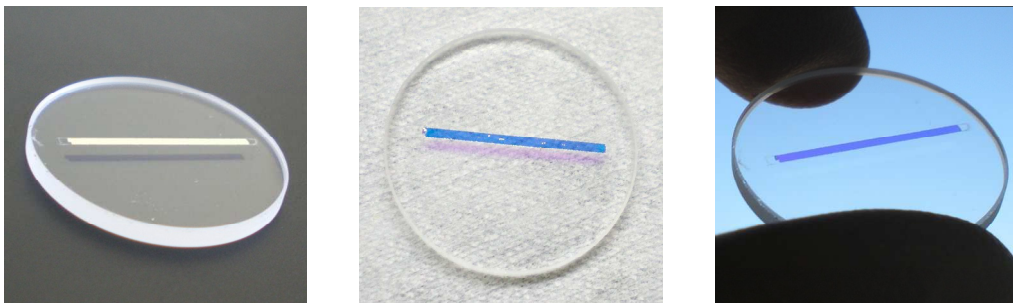


Figure 152 : Photographies de l'empilement transféré sur le substrat circulaire par gravure d'une couche de chrome.

L'étape de nettoyage du substrat montre, par l'absence d'apparition de paillettes, que le lien présente une certaine tenue mécanique. Une observation au microscope optique permet de valider la cosmétique du traitement ainsi transféré. Malgré la présence de certains défauts au centre, la géométrie ainsi que l'état de surface de l'empilement ne semblent pas avoir été dégradés lors de l'opération de transfert (Figure 153).



Figure 153 : Observation au microscope optique de l'empilement transféré.

Afin de compléter cette analyse, des mesures spectrales ont été effectuées le long de l'empilement transféré (Figure 154).

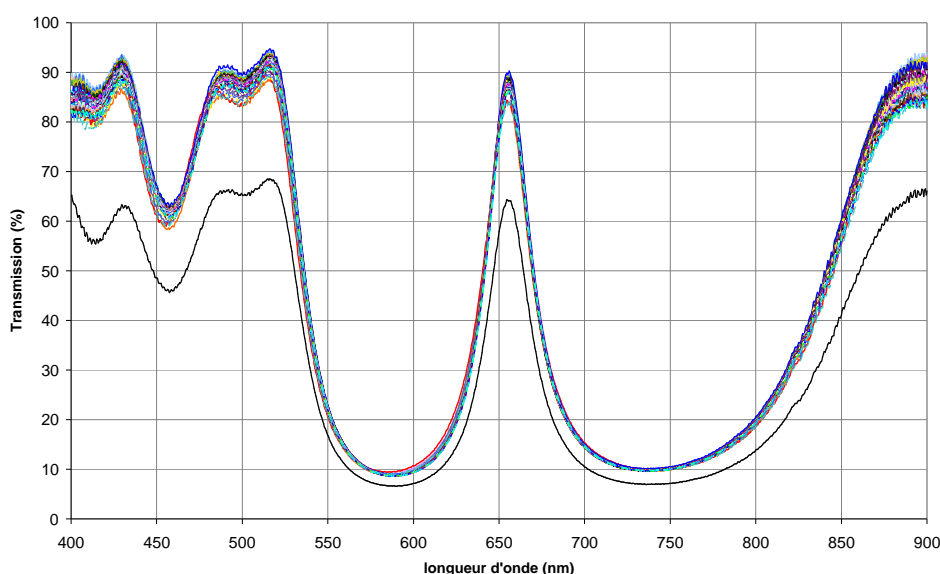


Figure 154 : 80 points de mesures répartis sur 13 mm de l'empilement transféré (résolution spatiale de mesure = 100 μm).

On constate alors que les profils spectraux relevés le long de l'empilement sont globalement très proches les uns des autres, une seule mesure présentant une baisse significative du taux de transmission liée à la présence d'un défaut local.

De plus la comparaison de ces profils spectraux avec celui mesuré sur une allumette témoin, dépourvue de la couche métallique, nous permet de valider que, sur toute la longueur du filtre, l'empilement a été transféré dans son intégralité et que la qualité optique du lien d'assemblage n'a pas été altérée, même localement, lors de cette opération. Il faut cependant garder à l'esprit, lors de cette comparaison, qu'afin de favoriser l'étape d'assemblage, l'empilement a été terminé par une couche de silice, et que le transfert a, en quelque sorte inversé les milieux extérieurs. Cette couche bas indice intervient donc dans les propriétés optiques de l'allumette témoin puisqu'elle se situe dans ce cas à l'interface avec l'air, tandis qu'elle n'a pratiquement aucun impact dans le cas du filtre transféré, puisqu'elle est alors placée à l'interface avec le joint d'assemblage dont la nature est très proche de celle de la silice. Cet effet peut être mis en avant en comparant les profils spectraux mesurés sur l'allumette témoin et sur l'empilement transféré (Figure 155) avec les profils spectraux théoriques comprenant ou non cette dernière

couche (Figure 156). La similitude observée permet alors de conclure que l'étape de transfert se passe bien sans altération de l'empilement du point de vue de sa fonction optique.

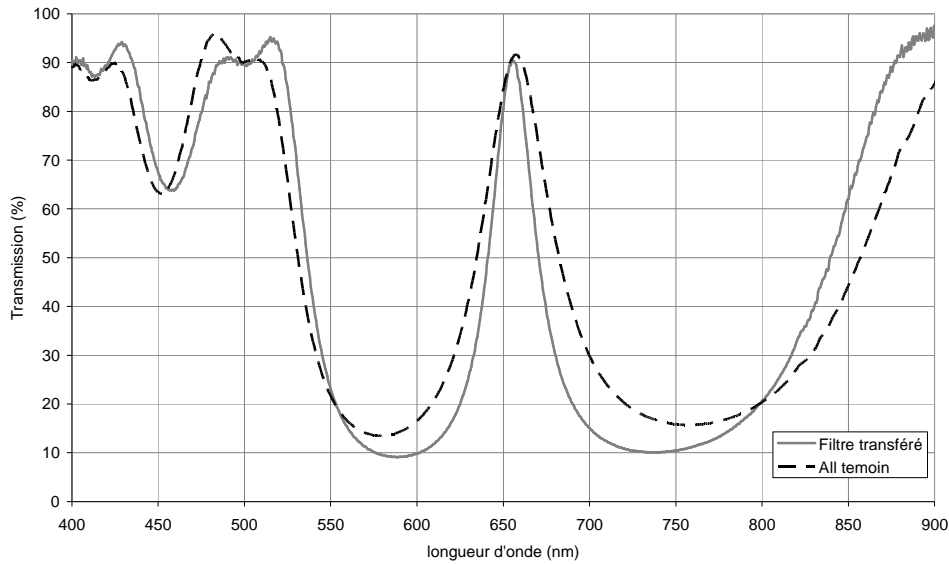


Figure 155 : Comparaison des profils mesurés sur l'empilement transféré et sur l'allumette témoin.

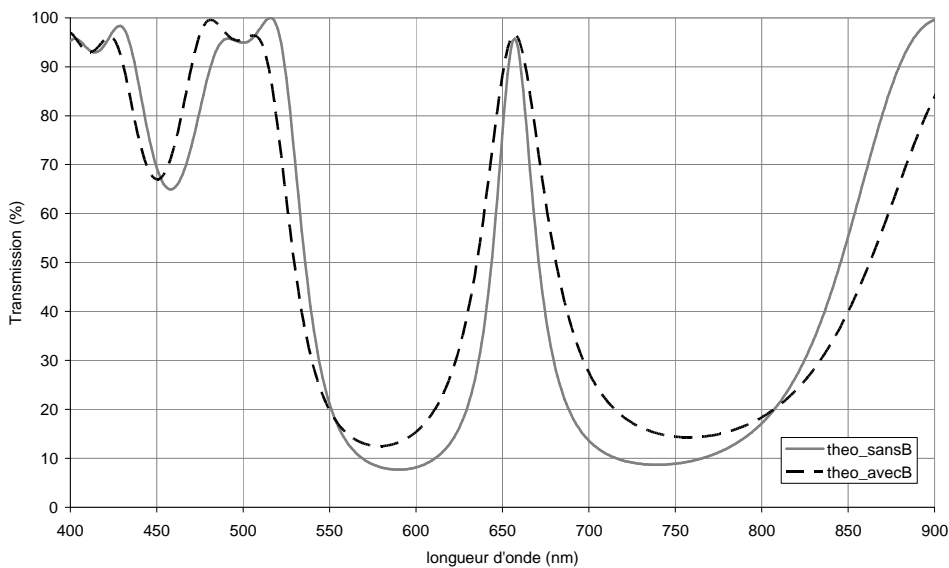


Figure 156 : Comparaison des profils spectraux théoriques, avec et sans dernière couche bas indice.

L'ensemble de ces résultats nous permet donc de valider le transfert par gravure d'une couche de chrome d'un empilement multicouche assemblé par hydratation / déshydratation catalysée par hydroxyde.

V. Conclusion

Un nouveau procédé de fabrication de filtres allumettes est ici proposé, basé sur la technologie de transfert de filtres. Le principe de cette technologie repose sur celui de la séparation d'un empilement multicouche du substrat sur lequel il a été déposé, associée à une étape préalable d'assemblage sur le substrat accepteur final.

Pour la fabrication de filtres allumettes, ce procédé permet une réalisation indépendante, sur des substrats provisoires, des étapes de dépôt et de structuration de chacun des filtres qui sont ensuite reportés sur la fenêtre portant la fonction absorbeur. Ainsi les risques associés à la réalisation de chacune des bandes du composant sont totalement dissociés, ce qui permet un rendement de fabrication indépendant du nombre de bandes spectrales. Ce procédé offre également l'avantage de minimiser la lumière parasite dans le système par réduction du nombre d'interfaces, et d'assurer la stabilité mécanique du composant par une architecture simplifiée.

Afin d'évaluer l'adéquation de cette technologie de transfert avec la réalisation de filtres allumettes, l'étape critique que représente la séparation de l'empilement a été validée expérimentalement par des tests de décollement d'empilements par gravure chimique d'une couche de chrome et d'aluminium. Puis, basée sur les recherches déjà effectuées précédemment, deux technologies d'assemblage ont été identifiées comme adaptées à nos besoins : l'adhérence moléculaire et l'assemblage par hydratation / déshydratation catalysée par hydroxyde. Une étude des déformations des substrats, confirmée par des mesures de planéité, a montré que les contraintes dans les couches engendraient des déformations trop importantes pour permettre un assemblage par adhérence moléculaire. Le procédé catalysé par hydroxyde offre quant à lui une plus grande flexibilité lui permettant de s'accommoder, dans une certaine mesure, de ces déformations. Des tests de transfert ont alors été réalisés sur des composants assemblés par hydratation / déshydratation catalysée par hydroxyde dans les deux configurations « aluminium » et « chrome ». La gravure de l'aluminium en milieu basique montre cependant une dégradation du lien d'assemblage. Bien que perfectible, ce procédé de transfert par gravure d'une couche d'aluminium en milieu basique sera manifestement difficile à maîtriser. Au contraire, le transfert par gravure de chrome a, quant à lui, été expérimentalement mis en œuvre avec succès, validé en outre par des mesures spectrales de l'empilement transféré, offrant ainsi de réelles perspectives pour la réalisation de composants complexes.

Conclusion

Pour répondre aux besoins toujours plus nombreux et variés des systèmes d'observation de la Terre, les instruments optiques embarqués sur satellites défilants présentent une structure de plus en plus compacte, intégrant les nouvelles avancées technologiques. Parmi ces avancées, la réalisation de la fonction de filtrage spectral directement dans le champ de l'instrument par un composant placé juste en avant du détecteur apparaît comme une solution particulièrement efficace. Ce composant, appelé filtre allumette, offre en effet de belles perspectives, par sa structure extrêmement compacte et surtout par ses performances de filtrage spectral, obtenues au moyen de traitements interférentiels multicouches. Cependant la complexité à la fois optique et géométrique de ce composant microstructuré rend sa fabrication délicate. Le procédé actuel monosubstrat, qui consiste à réaliser successivement les différents filtres sur un substrat unique, présente un rendement de fabrication d'autant plus faible que le nombre de bandes spectrales est élevé, ce qui le rend alors inadapté pour répondre au besoin croissant en terme de bandes spectrales des générations futures de satellites.

L'objectif des travaux menés dans le cadre de cette thèse a donc été d'explorer de nouvelles voies technologiques pour la fabrication de ces composants stratégiques. Afin de permettre une augmentation du nombre de bandes spectrales du composant, il convient de rendre le rendement de fabrication indépendant de ce nombre de bandes. Ceci ne peut être obtenu que par un procédé de fabrication dans lequel les différentes étapes relatives à chacun des filtres sont réalisées non plus en série mais en parallèle, de sorte que les risques inhérents à chacune des bandes ne pèsent plus sur le composant complet mais uniquement sur la voie en cours de réalisation. Pour cela, il est alors nécessaire de se tourner vers un procédé où chaque filtre est réalisé sur un substrat indépendant, puis assemblé en dernière étape pour constituer le composant final.

Nous avons tout d'abord étudié l'impact de cette nouvelle approche sur la définition et la fabrication de composants filtres allumettes. Celle-ci offre une grande flexibilité quant au choix de la structure même du composant. En effet, les différents éléments optiques, portant des fonctions de filtrage ou d'absorption, réalisées indépendamment les unes des autres, peuvent être arrangés selon de nombreuses architectures directement liées au choix de la technologie d'assemblage mise en œuvre. Les conséquences directes qui en résultent sur la synthèse des empilements optiques ont fait l'objet d'une analyse théorique mettant en avant l'influence du choix de l'architecture globale du composant, ainsi que du substrat, sur la détermination des formules des empilements multicouches. En parallèle, une analyse des différents procédés d'assemblage a permis d'identifier les mieux adaptés à notre application, et les procédés de collage, optique ou structural, d'adhérence moléculaire et d'assemblage par hydratation/déshydratation catalysée par hydroxyde ont ainsi été retenus. Des tests ont alors été réalisés afin de valider notamment la mise en œuvre de ces procédés face aux contraintes propres aux filtres allumettes. A l'issue de cette étude, cette démarche de fabrication par

assemblage a été mise en œuvre pour la réalisation de composants prototypes. Basés sur les spécifications du projet Sentinel-2 de l'ESA, ces prototypes, constitués de 10 bandes dans le domaine spectral VNIR, et 3 bandes dans le domaine SWIR, ont été réalisés par collage structural des différents éléments optiques, allumettes et fenêtres, sur une structure mécanique. Leurs performances spectrales, conformes aux spécifications initiales, ainsi que les résultats positifs aux tests de tenue à l'environnement spatial confirment, tant sur le plan optique que mécanique, la faisabilité de filtres allumettes par technologie d'assemblage. On notera que, du fait de leurs spécificités optiques et surtout géométriques, la caractérisation spectrale de ces composants a nécessité le développement d'un outil de métrologie dédié, afin de permettre des mesures directes sur le composant lui-même. Ce banc de mesure automatisé permet de caractériser localement la transmission des différents filtres dans des conditions d'éclairage représentatives des conditions d'utilisation, et avec des résolutions spatiales et spectrales pouvant atteindre respectivement 50 μm et 1 nm.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse ont donc permis, tout d'abord par une étude théorique puis par la réalisation de prototypes, de valider l'approche technologique de l'assemblage pour la réalisation de composants filtres allumettes, cette solution offrant de plus de nombreux avantages par rapport à une configuration monosubstrat. En effet, outre un rendement de fabrication indépendant du nombre de bandes spectrales, ce qui permet d'envisager un accroissement de leur nombre, l'assemblage permet d'envisager l'utilisation de substrat indépendant pour chaque filtre. Ainsi il devient possible, par optimisation de l'épaisseur optique de chacune des voies, de limiter la défocalisation entre les différentes bandes spectrales, et par conséquent d'améliorer la planéité de la surface image. Il est de plus envisageable d'utiliser des substrats de nature différente, participant alors directement à la fonction de filtrage spectral. Cette nouvelle structure de composant autorise également la répartition sur plusieurs interfaces des empilements multicouches, sans qu'il y ait nécessairement un empilement commun à toutes les voies. Les empilements peuvent être alors optimisés spécifiquement pour chaque bande spectrale, et la complexité de chacun des dépôts élémentaires réduite. Enfin, ce procédé de fabrication de composant permet la sélection des allumettes en fonction de leur cosmétique et minimise ainsi les imperfections du composant final.

En complément de ces travaux, une solution alternative, plus exploratoire, a été proposée, basée sur le transfert d'empilements multicouches. Cette solution permet de conserver une dissociation des risques de fabrication des différents filtres tout en offrant une architecture globale simplifiée par le retour à une configuration de substrat unique. L'étude des principales étapes de cette technologie novatrice, validées expérimentalement, a conduit à des résultats prometteurs, tout en mettant en avant différents points à améliorer pour lesquels des pistes de solution sont proposées. Celles-ci devront faire l'objet d'une analyse approfondie pour permettre la réalisation de composants selon ce procédé. En effet, au-delà des filtres allumettes, cette technologie de transfert offre des perspectives très intéressantes pour la réalisation d'autres structures de composants, tels que les filtres mosaïques qui visent à structurer spatialement la fonction de filtrage spectral à l'échelle du pixel d'une matrice de photodétecteurs, les faibles dimensions latérales de ces filtres n'autorisant plus alors l'utilisation de procédé de structuration de type *lift off*.

Références

- [1] EP1220003B1, « Architecture optique de télescope d'observation », Cerrutti-Maori, Alcatel (2001).
- [2] US5420789, « Geometrically corrected large angle whiskbroom scanner for low earth orbiting satellites », Fulton, ITT Defense & Electronics (1995).
- [3] J. Nieke, H. Schwarzer, A. Neumann, and G. Zimmermann, « Imaging Spaceborne and Airborne Sensor Systems in the Beginning of the Next Century », presented at The European Symposium on Aerospace Remote Sensing, London, United Kingdom, 22-26 September 1997.
- [4] US5768040, « Wide field-of-view imaging spectrometer », Macenka et al., Orbital Sciences Corporation (1998).
- [5] WO9705451, « Image acquisition method using push-broom scanning », Rouge et al., Centre National d' Etudes Spatiales (1997).
- [6] D. Laubier, and R. Mercier-Ythier, « Very long stripe-filter for a multispectral detector », in Proceedings of International Conference on Space Optics, Toulouse, France, 5-7 December 2000, pp.613-622.
- [7] WO2007095743, « Optically multiplexed imaging system and methods of operation », Achal et al., Itres Research Limited (2007).
- [8] Korsch D., « Anastigmatic three-mirror telescope », *App. Opt.* **16**, 2074-2077 (1977).
- [9] R. Le Goff, P. Pranyies, and I. Toubhans, « Focale plan AIT sequence: Evolution from HRG-SPOT 5 to PLEIADES HR », in Proceedings of International Conference on Space Optics, Noordwijk, The Netherlands, 27-30 June 2006.
- [10] J.L. Lamard, et al., «Design of the high resolution optical instrument for the PLEIADES HR earth observation satellites », in Proceedings of International Conference on Space Optics, Toulouse, France, 30 March-2 April 2004, pp. 149-156.
- [11] P. Pranyies, « Implantation de filtres allumettes sur un plan focal », presented at CNES-CCT Assemblages optiques complexes, Toulouse, France, 12-13 June 2008.
- [12] Takashi Y. Nakajima et al., « Optimization of the Advanced Earth Observing Satellite II Global Imager channels by use of radiative transfer calculations », *Appl. Opt.* **37**, 3149-3163 (1998).

- [13] S. De Béthune, F. Muller, and J.P. Donnay, « Fusion of multispectral and panchromatic images by local mean and variance matching filtering techniques », Fusion of Earth Data, Sophia Antipolis, France, 28-30 January 1998.
- [14] G. Cliche, F. Bonn, and P. Teillet, « Integration of the SPOT Panchromatic channel into its multispectral mode for image sharpness enhancement », Photogramm. Eng. Rem. Sens. **51**, 311-316 (1985).
- [15] M. Cathelinaud, F. Lemarquis, J. Loesel, and B. Cousin, « Metal-dielectric light absorbers manufactured by ion plating », in Advances in Optical Thin Films, C. Amra, N. Kaiser, H. A. Macleod, eds., Proc. SPIE Vol. **5250**, 511-518 (2004).
- [16] B. Badoil, F. Lemarchand, M. Cathelinaud, F. Lemarquis, and M. Lequime, « Direct monitoring of broadband light absorbers », Opt. Commun. **281**, 2367-2373 (2008).
- [17] B. Badoil, F. Lemarchand, M. Cathelinaud, and M. Lequime, « Manufacturing of an absorbing filter controlled with a broadband optical monitoring », Opt. Express **16**, 12008-12017 (2008).
- [18] H.A. Macleod, « Band-pass filter » in Thin-film optical filter, second edition, Ed. A.Hilger Ltd (1996).
- [19] H.A. Macleod, and E. Pelletier, « Error compensation mechanisms in some thin-film monitoring systems », Opt. Acta **24**, 907-930 (1977).
- [20] H. Jansen et al, « A survey on the reactive ion etching of silicon in microtechnology », J. Micromech. Microeng. **6**, 14-28 (1996).
- [21] F. Marty et al., « Advanced silicon etching techniques based on deep reactive ion etching (DRIE) for silicon harms and 3D micro- and nano-structures », European Micro and Nano Systems Conference, Noisy le Grand, France, 20-21 October 2004, pp. 25-28.
- [22] J. Ihlemann, and B. Wolff-Rottke, « Excimer laser ablation patterning of dielectric layer », Appl. Surf. Sci. **86**, 228-233 (1995).
- [23] J.D. Barrie, K.A. Aitchison, G.S. Rossano, and M.H. Abraham, « Patterning of multilayer dielectric optical coatings for multispectral CCDs », Thin solid films **270**, 6-9 (1995).
- [24] J. Angele, P. Davi, D. Laroche, and P. Payen, « Les "Filtres Allumettes" composant-clé pour la télédétection », in Proceedings of International Conference on Space Optics, Toulouse, France, 2-4 December 1997.
- [25] J. Haisma, « Diversity and feasibility of direct bonding: a survey of a dedicated optical technology », Appl. Opt. **33**, 1154-1169 (1994).
- [26] US5846638, « Composite optical and electro-optical devices », Meissner, Onyx Optics Inc. (1998).
- [27] U. Gösele, and Q.Y. Tong, « Semiconductor Wafer Bonding: Science and Technology », The Elect. Chem. Soc. Series, Wiley-Interscience (1999).
- [28] D. Shaddock, and A. Abromovici, « Solution-Assisted Optical Contacting: Components in optical contact can be adjusted for about a minute », NASA Tech Briefs (March 2004).
- [29] J.J. Fermé, « Optical Contacting », Optical Systems Design, Saint-Etienne, France, 29 September - 3 October 2003.
- [30] US6946363, « Method for bonding substrates », Davidson, Sun Microsystems Inc. (2005).

- [31] J. Floriot, « Filtres bande étroite à cavités-substrats – Application au domaine des télécommunications optiques », Thèse de doctorat, Université Paul Cézanne Aix-Marseille III (2004).
- [32] US6284085, « Ultra precision and reliable bonding method », Gwo, Stanford University (2001).
- [33] US6548171, « Hydroxide-catalyzed bonding », Gwo, Stanford University (2003).
- [34] S. Reid, G. Cagnoli, E. Elliffe, J. Faller, J. Hough, I. Martin, and S. Rowan, « Influence of temperature and hydroxide concentration on the settling time of hydroxyl-catalysis bonds », *Phys. Lett. A* **363**, 341-345 (2007).
- [35] E.J. Elliffe, J. Bogenstahl, A. Deshpande, J. Hough, C. Killow, S. Reid, D. Robertson, S. Rowan, H. Ward, and G. Cagnoli, « Hydroxide-catalysis bonding for stable optical systems for space », *Class. Quantum Grav.* **22**, S257-S267 (2005).
- [36] S. Rowan, J. Bogenstahl, A. Deshpande E.J. Elliffe, J. Hough, C. Killow, S. Reid, D. Robertson, and H. Ward, « Silicate bonding for stable optical systems for space », presented at 5th International LISA Symposium, ESTEC, Noordwijk, The Netherland, 13 July 2004.
- [37] M. Strzelecki, N. Wyckoff, R. O'Malley, L. Gilroy, and D. Schimmel, « Sticking together », *Spie's oe magazine*, pp. 27-29 (2003)
- [38] C. Click, L. Gilroy, and D. Vanderpool, « Low Temperature Bonding for Precision Optics », presented at Technology Days NASA, 17-19 August 2004.
- [39] US2006225638, « Process for the low-temperature joining of bodies, and products produced in accordance with the process », Hauke et al., Schott AG (2006).
- [40] M. Strzelecki, et al., « Low Temperature Bonding of Light-Weighted Mirrors », *Proc. SPIE* **5179**, 50-55 (2003).
- [41] C. Myatt, N. Traggis, and K. Li-Dessau, « Optical contacting grows more robust », *Laser Focus World* **42** (2006).
- [42] L. Abel-Tiberini, « Filtres interférentiels à propriétés spatialement maîtrisées », Thèse de doctorat, Université Paul Cézanne Aix-Marseille III (2005).
- [43] L. Abel-Tiberini, F. Lemarquis, and M. Lequime, « Dedicated spectrophotometer for localized transmittance and reflectance measurements », *Appl. Opt.* **45**, 1386-1391 (2006).
- [44] EP1262803A1, « Stress free thermally stabilized dielectric optical filter », Ockenfuss, JDS Uniphase Inc. (2002).
- [45] G.J. Ockenfuss, and R.E. Klinger, « Ultra-low stress thin film interference filters », *Appl. Opt.* **45**, 1364-1367 (2006).
- [46] US5241417, « Multi-layered optical filter film and production method thereof », Sekiguchi, Copal Company Limited (1993).
- [47] US4373775, « Fiber dichroic coupler », Gasparian, International telephone and Telegraph (1983).
- [48] US5751487, « Multilayered filter films and method for making the same », Someno, Alps Electric Co.,Ltd. (1998).

- [49] DE4124937, « Stable, unsupported optical interference layer system - mfd. by the evapn. of silicon and titanium sub-oxides on to a soluble base layer», Schmidt et al., OIB GmbH (1992).
- [50] EP0703609, « Process of manufacturing a structure having a thin semiconductor layer on a substrate», Bruel et al., Commissariat à l'Energie Atomique (1996).
- [51] WO03081664, « Method for transferring elements between substrates», Aspar et al., Commissariat à l'Energie Atomique (2003).
- [52] EP0977252, « Selective transfer of elements from one support to another support », Aspar et al., Commissariat à l'Energie Atomique (2000).
- [53] L. Holland, « Vacuum deposition of thin films », Chapman & Hall (1960).
- [54] C. Gauthier, « Contribution à l'étude du fractionnement de l'aluminium libéré dans des solutions de sols forestiers. Influence de la quantité et de la nature de la matière organique », Thèse de doctorat, Université de Limoges (2002).
- [55] G. G. Stoney, « The Tension of Metallic Films deposited by Electrolysis », Proc. of the Royal Society of London **A82**, 172-175 (1909).
- [56] G.C.A.M. Janssen, M.M. Abdalla, F. van Keulen, B.R. Pujada, and B. van Venrooy, « Celebrating the 100th anniversary of the Stoney equation for film stress: Developments from polycrystalline steel strips to single crystal silicon wafers », Thin Solid Films **517**, 1858-1867 (2009).
- [57] M. Ohring, « Mechanical Properties of Thin Films» in The Materials Science of Thin Films, Academic Press (1992).
- [58] C. Mahodaux, « Les contraintes dans les matériaux diélectriques en couche mince : empilements, évolution avec le recuit et l'implantation ionique », Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille III (1999).