



HAL
open science

Etude d'une méthode de micro-fabrication 3D pour des applications microlentilles d'imageurs

Pierre Chevalier

► **To cite this version:**

Pierre Chevalier. Etude d'une méthode de micro-fabrication 3D pour des applications microlentilles d'imageurs. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2021. Français. NNT : 2021GRALY004 . tel-03291995

HAL Id: tel-03291995

<https://theses.hal.science/tel-03291995>

Submitted on 20 Jul 2021

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Physique du rayonnement et de la matière condensée.**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Pierre CHEVALIER

Thèse dirigée par **Jérôme VAILLANT**, Université Grenoble Alpes
et codirigée par **Patrick QUÉMÉRÉ**, CEA Leti et **Charlotte BEYLIER**, STMicroelectronics

préparée au sein du **Laboratoire d'Électronique et de Technologie de l'Information (CEA-Leti)**
dans l'**École Doctorale de Physique de Grenoble**

Étude d'une méthode de micro-fabrication 3D pour des applications de microlentilles d'imageurs.

Thèse soutenue publiquement le **23 Mars 2021** devant le jury composé de :

Pr Patricia, SEGONDS

Professeur, Université Grenoble Alpes, Présidente (Examinatrice)

Pr Juergen, BRUGGER

Professeur, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Examineur

Pr Yves, JOURLIN

Professeur, Université Jean Monnet, Rapporteur

Dr Antoine, MOREAU

Maître de conférences, Institut Pascal, Rapporteur

Pr Isabelle, SCHANEN

Professeur, Grenoble INP, Examinatrice



The true delight is in the finding out
rather than in the knowing.

Isaac Asimov

Remerciements

Je tiens à commencer mes remerciements par Charlotte Beylier mon encadrante de thèse STMicroelectronics, sans qui ce manuscrit n'aurait jamais vu le jour. Merci de m'avoir fait confiance et motivé à m'engager dans cette aventure à une période charnière de ma vie. Pour ton humanité, ton soutien et ton implication à faire vivre et rayonner mon travail à ST je te remercie profondément.

Mes remerciements vont également aux membres de mon laboratoire d'accueil pour les conditions de travail qui m'ont été offertes au cours de ces trois années. Merci pour votre bienveillance, votre ouverture d'esprit et votre curiosité. Mes remerciements s'adressent particulièrement à deux membres de l'équipe : Sébastien Bérard-Bergery et Patrick Quéméré.

Sébastien, je remercie ici tes qualités humaines en tant que chef de projet sur le grayscale. Merci pour toutes tes démarches, ces heures passées en réunion et ces mails par centaines où tu as porté et défendu le grayscale et ses possibilités parfois contre vents et marées. Le sujet continue après la thèse et c'est grâce à ton abnégation et ta capacité à faire travailler les gens ensemble.

Patrick, tu as fais de moi un meilleur scientifique. Merci pour tes conseils, ton aide et tes remarques qui ont participé à mon émancipation et ma montée en compétences dans ce travail. Merci de ce côté *tough but fair* qui m'aura réellement aidé à développer mon esprit critique. Je te remercie de ton implication sans faille au cours de ces trois années.

Je remercie également Jérôme Vaillant mon directeur de thèse pour sa confiance et sa disponibilité tout au long de la thèse. Merci pour tes apports et tes remarques pertinentes qui m'ont souvent fait prendre du recul sur mon travail.

À ces remerciements s'ajoutent toutes les personnes ayant travaillé de près ou de loin sur ce sujet de thèse. J'adresse des remerciements particuliers à Nacima Allouti et Rémi Coquand sur qui j'ai pu me reposer pour obtenir un grand nombre de mes résultats expérimentaux. Merci pour votre travail tout particulièrement pendant la dernière année alors que les contraintes étaient plus nombreuses que jamais.

Bien évidemment ces trois années de thèse ont également été propices à de nombreuses rencontres parmi lesquelles figurent aujourd'hui des amis très chers. Je ne les listerai pas ici de peur d'en oublier mais je ne doute pas qu'ils sauront se reconnaître. Il serait cependant injuste de ne pas citer Charles, mon co-bureau dont la passion pour les sciences n'a d'égale que celle de la politique. Malgré sa tentative de mettre fin à mes jours sur les flancs du Grand Veymont («c'est légèrement exposé, ça passe.») je tiens à le remercier chaleureusement de sa compagnie, et des nombreuses discussions que nous avons eues et continuons à avoir tous deux.

Merci à ceux qui ont partagé ma vie au quotidien durant ces trois années : Marie, Mehdi et Aurélie. Chacun à votre manière vous avez su me soutenir, me donner confiance en moi et m'apprendre beaucoup de choses. Pour cela je vous remercie.

Mes remerciements se tournent à présent vers mes proches. Merci à ma mère, mon père et ma sœur pour leur soutien dans les moments difficiles et leur présence dans les bons. Cette thèse est aussi la vôtre.

Table des matières

Remerciements

Glossaire

Introduction générale	1
0.1 Contexte et problématique	1
0.2 Objectifs de la thèse	6
1 Introduction à la photolithographie	8
1.1 Loi de Moore, et de More Than Moore	9
1.2 Étapes de réalisation d'un circuit en microélectronique	10
1.3 Description des techniques et systèmes de lithographie	12
1.3.1 Lithographie par contact et proximité	12
1.3.2 Lithographie par projection	13
1.3.3 Source lumineuse	15
1.3.4 Illumination de Köhler	19
1.3.5 Masque	20
1.3.6 Système de projection	22
1.3.7 Résine	27
Conclusion	29
2 État de l'art : la microfabrication 3D	30
2.1 Techniques sans masque	31
2.1.1 Micro-miroirs digitaux	31
2.1.2 Écriture directe par laser	32
2.2 Techniques avec masque	33
2.2.1 Lithographie à exposition multiple	33
2.2.2 Fluage thermique	33
2.2.3 Lithographie grayscale avec masque HEBS	35
2.2.4 Lithographie grayscale avec masque binaire	36
Conclusion	45
3 Modèle photolithographique	46
3.1 Modèle optique	47
3.1.1 Hypothèses du modèle	48
3.1.2 Définition de la source	50
3.1.3 Définition du masque et de son spectre	51

3.1.4	Définition du système de projection	52
3.1.5	Calcul de l'image aérienne	56
3.1.6	Comparaison modèle Abbe et Hopkins	59
3.1.7	Conclusion modèle optique	61
3.2	Modèle résine	62
3.3	Simulation de l'exposition	63
3.4	Simulation du développement	69
3.4.1	Fonctions de développement	69
3.4.2	Résolution de la fonction de développement	70
3.4.3	Comparaison du modèle de développement 1D et 3D	70
3.4.4	Conclusion modèle résine	71
3.5	Périodicité du modèle : notion de densité	72
	Conclusion	74
4	Réalisation et exploitation du masque FISH	75
4.1	Méthodologie de création de FISH	76
4.2	Description des principaux masques embarqués sur FISH	79
4.2.1	Microlentilles	79
4.2.2	Microlentille inversée	80
4.2.3	Pyramide	80
4.2.4	Piliers	81
4.3	Conditions de procédé : empilement, exposition et développement	82
4.4	Descriptions des équipements de métrologie et des mesures	83
4.4.1	Métrologie - Profilomètre	84
4.4.2	Métrologie - Microscope électronique à balayage (SEM)	86
4.4.3	Métrologie - AFM	88
4.5	Conclusion sur la métrologie, choix de la résine et de l'empilement	93
4.6	Calibration du modèle de développement	94
4.6.1	Fonction de coût	94
4.6.2	Description de l'optimiseur	95
4.6.3	Résultats de la calibration	95
4.6.4	Visualisation des profils calibrés	101
4.7	Conclusion	105
5	Optimisation de masque grayscale	107
5.1	Méthodologie d'optimisation de masque	108
5.2	Optimisation du masque	109
5.2.1	Choix de l'optimiseur	109
5.2.2	Initialisation	110
5.2.3	Paramètres à optimiser	110
5.2.4	Fonction de coût	112
5.2.5	Respects des règles de dessin du masque	113
5.2.6	Critère d'arrêt	115
5.2.7	Retrait des plots de chrome inutiles	115
5.2.8	Conclusion	115

5.3	Détermination de l'image aérienne cible I_{tgt} à partir du profil résine cible P_{tgt} . . .	116
5.4	Résultats d'optimisation de l'image aérienne	119
5.4.1	Microlentille	119
5.4.2	Pyramide	120
5.5	Optimisation du masque au profil résine	122
5.5.1	Microlentille	122
5.5.2	Pyramide	123
5.5.3	Conclusion	124
5.6	Création d'un nouveau masque grayscale optimisé	125
5.6.1	Évolution des conditions de procédé	125
5.6.2	Profils expérimentaux	126
5.6.3	Conclusion	145
6	Conclusions et perspectives	147
6.1	Conclusions	147
6.2	Améliorations et perspectives	149
6.2.1	Vers un modèle lithographique plus poussé	149
6.2.2	Résine négative	149
6.2.3	Motifs non Manhattans	150
6.2.4	Utilisation d'une nouvelle norme	151
6.2.5	Intelligence artificielle	151
	Bibliographie	152
	Table des figures	158
	Liste des tableaux	165
7	Annexes	i
7.1	La diffraction de la lumière	i
7.2	Prise en compte du defocus	iii
7.3	Caractéristiques de la machine utilisée au cours de la thèse	v

Glossaire

AFM Atomic Force Microscopy. 7, 40, 83, 88, 126, 127, 132, 135, 137–139, 147, 151

BARC Bottom Anti Reflective Coating. 28, 82

BSI Back Side Illumination. 3, 4, 159

CAR Chemically Amplified Resist. 27

CCD Charge Coupled Device. 1–3, 159

CD-SEM Critical Dimension SEM. 86–88, 162

CMOS Complementary Metal Oxide Semiconductor. 1–6, 10, 159

CMP Chemical Mechanical Polishing. 10

DMD Digital Micro-Mirrors. 31, 32

DNQ DiazoNaphthoQuinone. 27, 63

DTI Deep Trench Isolation. 4, 5, 159

EUV Extrême Ultra-Violet. 33

FDTD Finite Difference Time Domain. 51

FEM Focus Exposure Matrix. 83, 86, 162

FSI Front Side Illumination. 3–5, 159

HEBS High Energy Beam Sensitive. 35, 160

ILT Inverse Lithography Techniques. 151

LPD Large PhotoDiode. 79, 80, 82, 125, 143–145, 148, 162, 165

LPM Lumped Parameter Model. 64, 65

MEMS Microsystèmes électromécaniques. 10, 30

minCD Minimum Critical Dimension. 21, 26, 43, 76, 113

minSPACE Minimum Space Dimension. 21, 76, 113, 114, 125, 163

MOS Metal Oxide Semiconductor. 1

MRC Mask Rules Check. 21

PAC Composé Photo-Actif (Photo Active Compound). 63, 66, 67, 69, 70

PDM Pulse Density Modulation. 37, 41, 109

PMMA Poly(methyl methacrylate). 31

PWM Pulse Width Modulation. 36, 37, 40–42, 75, 76, 109, 160

RCWA Rigorous Coupled Wave Analysis. 51

RIE Reactive Ion Etching. 32, 41

SEM Microscope électronique à balayage. 7, 34, 83, 86–88, 126, 130, 131, 133, 135, 140, 142, 144, 145, 160, 162, 164, 165

SPD Small PhotoDiode. 79, 80, 125, 143–145, 148, 162, 165

TARC Top Anti Reflective Coating. 28

TCC Transmission Cross-Coefficient. 57–62, 161

TMAH Tetramethylammonium hydroxide. 83

Introduction générale

0.1 Contexte et problématique

Les capteurs d'images équipent des dispositifs électroniques variés dont le point commun est la collection d'un signal lumineux suivie d'un traitement électronique. Les capteurs d'images peuvent être divisés en deux familles : les capteurs Charge Coupled Device (CCD) et les capteurs Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS).

Le fonctionnement des deux types de capteurs est assez proche : leur surface est constituée d'un maillage de circuits sensibles à la lumière. Chaque élément photosensible de cette matrice est appelé pixel. Les deux technologies se différencient par le traitement électronique du signal capté par chaque pixel¹ :

- Dans un capteur CCD, une capacité électrique est associée à chaque pixel. Cette capacité contient la charge électrique relative à l'intensité lumineuse reçue par le pixel. Un circuit de contrôle permet de transférer les charges d'une capacité à sa voisine. Ce transfert est réalisé en cascade jusqu'à une ligne de lecture où la totalité de la charge est transmise pour traitement du signal.
- Dans un capteur CMOS, chaque pixel est associé à un transistor CMOS permettant le traitement individuel de l'information lumineuse reçue par ce dernier. En utilisant un circuit logique, l'information de chaque pixel de la matrice peut être récupérée et traitée.

Les capteurs CCD furent inventés en 1969 [Boyle and Smith, 1970] et utilisés rapidement par les industriels. Dès 1975, Kodak introduisit sur le marché un appareil photographique basé sur la technologie CCD [Kodak, 2012]. Le développement d'un capteur d'images basé sur la technologie Metal Oxide Semiconductor (MOS) fut envisagé à la même période. Cependant, l'industrie microélectronique n'était pas encore suffisamment mature pour permettre la fabrication de capteurs fiables. Les premiers exemplaires industriels ne furent produits qu'à partir des années 1990.

Bénéficiant d'une sensibilité accrue et d'une qualité d'image supérieure, les capteurs CCD se sont longtemps maintenus au devant de la technologie CMOS. Cependant, depuis une vingtaine d'années cette tendance s'est progressivement inversée. La fin de la technologie CCD fut envisagée dès 1993 : «*Active pixel sensors : are CCDs dinosaurs ?*» [Fossum, 1993]. Associant une vitesse d'acquisition supérieure et des coûts de fabrication plus bas, les capteurs d'images CMOS se sont implantés dans des domaines autrefois réservés aux capteurs CCD. Cette évolution est en grande partie le fruit des innovations introduites dans le cadre de la miniaturisation des composants en circuit logique CMOS. Sony, principal acteur sur le marché des capteurs d'images annonça la fin de la production de ses capteurs CCD en 2015 [Vision, 2015]. La Figure 1 présente l'évolution de la pénétration de marché² pour les capteurs d'images CMOS et CCD entre 2011 et 2023.

1. Les explications données ci-dessous ne sont que partielles, un lecteur intéressé peut se référer à l'ouvrage suivant [Ohta, 2020] afin d'obtenir une description plus poussée des différences entre capteurs CMOS et CCD.

2. Le taux de pénétration du marché est, en marketing, un taux mesurant la couverture du marché par un produit ou un service donné.

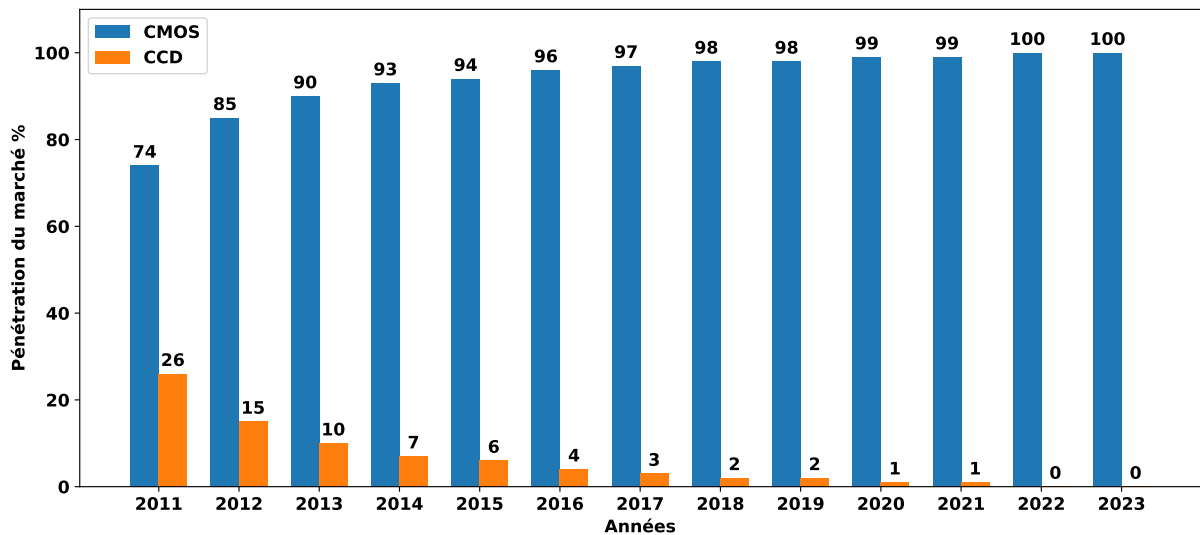


FIGURE 1 – Évolution de la pénétration de marché pour les capteurs CMOS et CCD entre 2011 et 2023 [Développement, 2018].

D'un point de vue produit, les capteurs d'images CMOS sont utilisés dans les domaines de la téléphonie, de l'automobile, de l'industrie médicale ou encore de la sécurité. À titre d'exemple, le smart-phone Galaxy S20 commercialisé par Samsung incorpore 5 caméras à capteur CMOS dont la plus avancée est composée de 108 millions de pixels. Les capteurs d'images CMOS sont fabriqués à échelle industrielle sur des substrats de silicium de 200 et 300mm. La distance séparant deux pixels voisins sur le capteur est appelée *pitch* (période en français). L'évolution de cette grandeur est cruciale pour comprendre la transformation du marché des capteurs d'images CMOS.

Afin de répondre aux besoins du marché qui tend vers la miniaturisation, les fabricants de capteurs cherchent à réduire la taille du pitch. De cette manière, un nombre plus important de pixels peut être intégré sur une même puce. À l'origine, le pitch était réduit tous les ans, mais cette tendance s'est ralentie au fur et à mesure que la taille de pitch s'est rapprochée des longueurs d'onde du visible. De 2006 à 2009, le pitch est passé de $2.2\mu\text{m}$ à $1.75\mu\text{m}$. Le passage du pitch $1.4\mu\text{m}$ à $1.12\mu\text{m}$ a pris 3 ans (2008 à 2011), puis 4 ans pour atteindre $1\mu\text{m}$ (2015), et trois années supplémentaires pour atteindre $0.9\mu\text{m}$ (2018) [Fontaine, 2019]. Aujourd'hui, le pitch minimal industrialisé est fabriqué par Samsung avec $0.7\mu\text{m}$ [Samsung, 2020].

La Figure 2 ci-contre représente l'évolution du pitch en fonction des années pour les capteurs d'images CMOS fabriqués par STMicroelectronics.

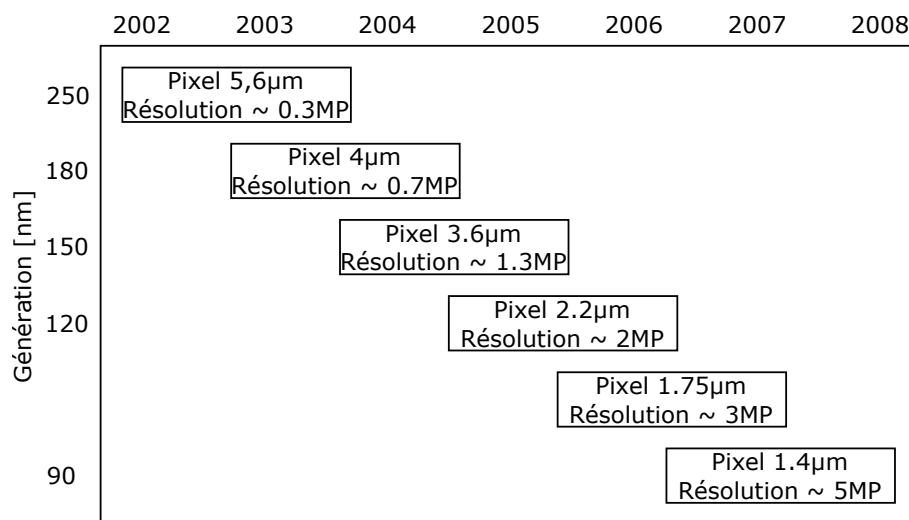


FIGURE 2 – Évolution de la taille de pixel des capteurs d’images commercialisés par STMicroelectronics entre 2002 et 2008 [Audran, 2007]. Le pixel de 1.4µm est toujours fabriqué aujourd’hui.

Avant de poursuivre la discussion, nous rappelons la définition de deux notions clés des capteurs d’image : leur résolution et leur définition.

Différence entre définition et résolution

- La **définition** d’une image correspond au nombre de pixels qui la composent. Par exemple, une image composée de 2000 pixels en x et de 3000 pixels en y possède une définition de 6 millions de pixels. Le nombre de pixels de l’image est évidemment le même que le nombre de pixels du capteur (sauf en cas d’interpolation).
- La **résolution** de l’image correspond à la densité surfacique de pixels sur le capteur d’image. Plus la résolution est importante plus le nombre de pixels par unité de surface est important.

Le nombre de pixels présents sur le capteur (sa définition) ne détermine pas à lui seul la qualité de l’image. Cette dernière dépend principalement de la capacité des pixels à traiter l’intensité lumineuse reçue dans des conditions réelles. Par exemple, il peut être plus intéressant d’avoir moins de pixels mais avec une meilleure réponse à faible lumière que l’inverse. Lorsque les conditions d’illumination sont difficiles, par exemple en faible lumière, ou pour des prises d’images à haute fréquence, les capteurs CCD représentent toujours une meilleure alternative aux capteurs CMOS.

Les industriels ont développé des solutions innovantes afin de se maintenir dans la course à la réduction du pitch. Dans les paragraphes qui suivent, une partie de ces innovations seront présentées. L’objectif visé n’est pas de les présenter exhaustivement mais de souligner leurs variétés et leurs complexités. Une des premières innovations introduite est une évolution architecturale. Jusqu’en 2009, la technique de fabrication des imageurs CMOS était basée sur une architecture dite d’illumination frontale : Front Side Illumination (FSI). Cette architecture est illustrée sur la Figure 3a. À partir de 2009, une nouvelle architecture est introduite permettant de poursuivre la réduction de la taille du pitch : l’illumination arrière Back Side Illumination (BSI). Cette architecture, illustrée sur la Figure 3b permet deux avancées :

1. La réduction de la distance parcourue par les photons entre leur collection par la micro-lentille et leur capture par la photo-diode.

2. Le découplage entre la partie optique du capteur et la partie électronique.

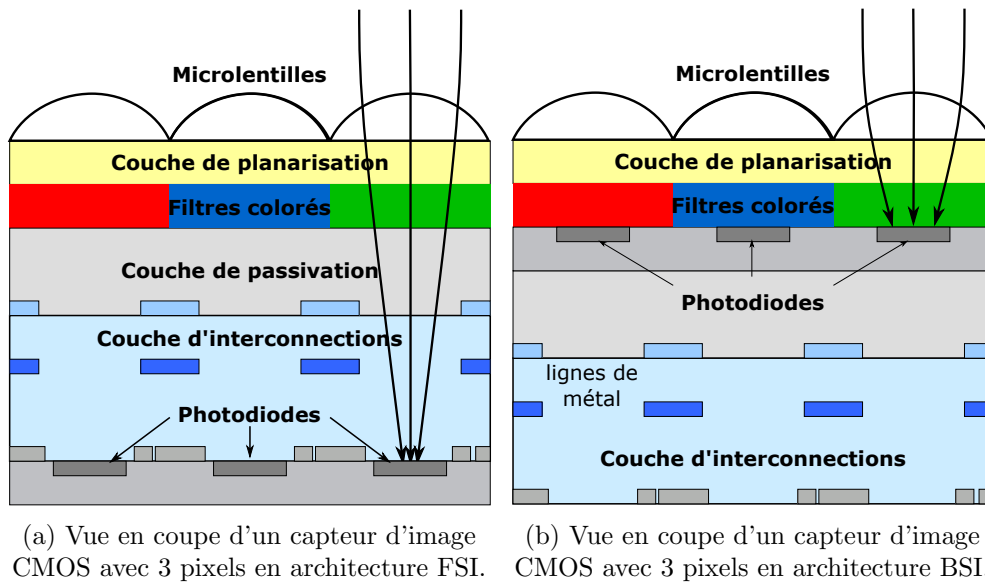


FIGURE 3 – Vue en coupe de l'architecture FSI et BSI pour les capteurs d'images CMOS. Le trajet de la lumière dans l'architecture est représenté sous forme de 3 flèches. Ce trajet est plus court dans le cadre de l'architecture BSI que FSI.

Dans les deux configurations la lumière reçue à l'avant du capteur est focalisée sur la zone photosensible (une photo-diode) par l'intermédiaire d'une microlentille située au sommet de l'empilement. Les filtres colorés, situés sous la couche de planarisation, sont composés d'une matrice polymère dans laquelle sont dispersés des pigments absorbants dans une gamme de longueur d'onde donnée. Lorsque la lumière traverse un filtre coloré, seule une portion de son spectre est transmise. Les empilements illustrés sur la Figure 3 utilisent un agencement de filtres RGB (Red Green Blue) de manière à obtenir une sensibilité sur tout le spectre visible.

La photo-diode bénéficie également d'améliorations : son épaisseur est augmentée afin d'accroître la probabilité de formation d'une paire électron/trou. En parallèle, sa largeur diminue pour suivre la diminution du pitch. L'importance de la focalisation de la lumière par les microlentilles est donc primordiale. Chaque microlentille est obtenue par fluage thermique d'un cylindre de résine préalablement réalisé par photolithographie³. Afin de permettre la création d'une matrice de microlentilles au-dessus de la matrice de pixels, les résines doivent répondre à plusieurs exigences :

- Être transparentes aux longueurs d'onde d'intérêt.
- Avoir des propriétés physico-chimiques compatibles avec une mise en forme par traitement thermique (la microlentille doit recouvrir au maximum la surface du pixel après l'étape de fluage).

Lorsque la taille des microlentilles diminue, le maintien de la forme devient plus complexe. Lorsque les microlentilles fabriquées ne correspondent pas à la forme attendue, un phénomène de *cross-talk* optique peut se produire : un rayon lumineux reçu par une microlentille est capté par une photo-diode différente. Le «cross-talk» n'est pas seulement de nature optique mais également électrique : des électrons ou des trous peuvent diffuser d'un pixel à un autre. Afin de supprimer cette diffusion de charges, une nouvelle innovation a été introduite. Une couche isolante verticale de SiO_2 est rajoutée entre chaque pixel : il s'agit de la Deep Trench Isolation (DTI) développée par STMicroelectronics.

3. La photolithographie sera décrite en détail dans le chapitre suivant

La Figure 4 ci-contre, extraite de l'article [Tournier et al., 2011] propose une visualisation de l'isolation DTI.

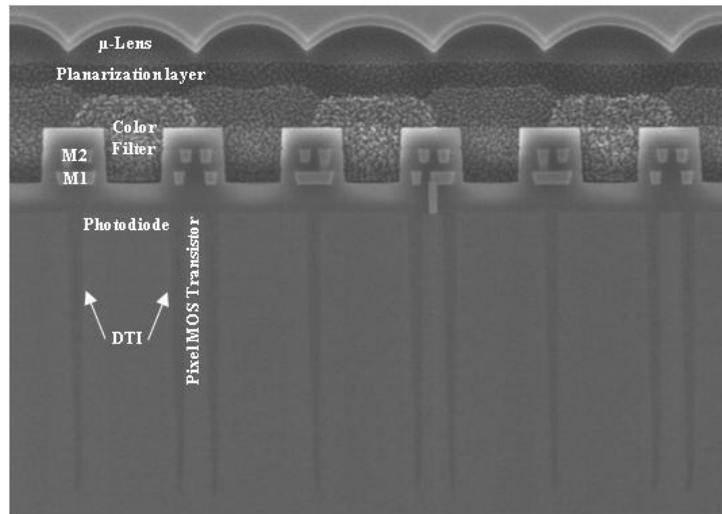


FIGURE 4 – Vue en coupe d'un capteur d'image CMOS en technologie FSI fabriqué par STMicroelectronics illustrant une isolation DTI.

Les bénéfices des innovations présentées jusqu'à présent peuvent se mesurer à l'aide du facteur d'efficacité quantique du pixel (QE). Exprimé en pourcentage, le QE correspond au rapport entre le nombre de charges collectées dans la photo-diode relativement au nombre de photons reçus par cette dernière. Le QE permet de quantifier la sensibilité du capteur à la lumière. Dans le cas d'un capteur d'image CMOS l'efficacité quantique est souvent donnée sous la forme de trois courbes correspondant aux trois types de pixels de la configuration RGB. Un exemple d'une courbe de QE est illustré sur la Figure 5 ci-dessous.

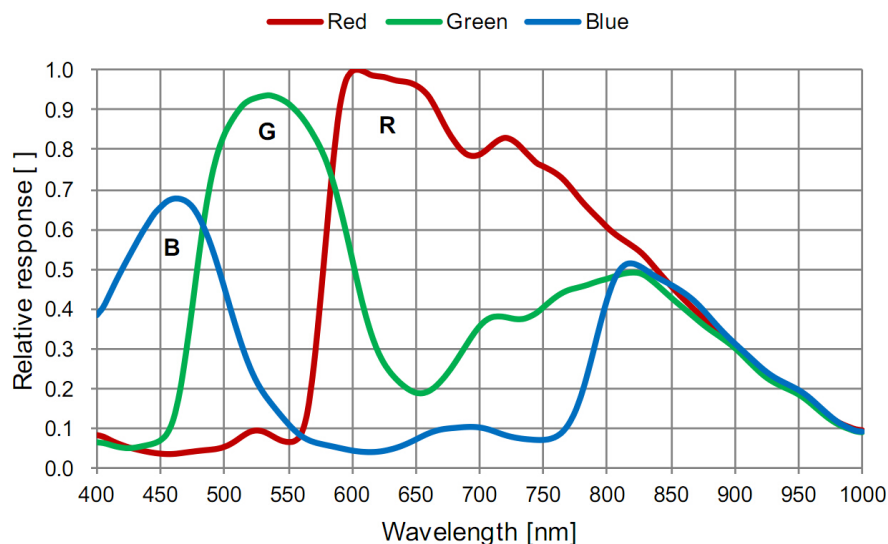


FIGURE 5 – Efficacité quantique des pixels rouge, vert et bleu en fonction de la longueur d'onde. L'efficacité quantique de chaque pixel est maximale dans la gamme de longueur d'onde correspondante.

Plus le QE est élevé, meilleure est la sensibilité du capteur. Idéalement, on souhaite avoir un QE le plus élevé pour chaque pixel tout en se rapprochant des courbes idéales établies par la commission internationale de l'éclairage [CIE, 2020].

Les quelques exemples présentés ici ne sont qu'un aperçu du travail de recherche et développement réalisé par les industriels. L'amélioration des capteurs d'images CMOS est un problème multiparamètres complexe où chaque piste d'amélioration doit répondre à un cahier des charges précis. La thèse s'inscrit dans ce travail de recherche en proposant l'étude d'une approche innovante de fabrication de formes complexes en résine photosensible, notamment appliquée à la réalisation de microlentilles.

0.2 Objectifs de la thèse

Les objectifs de la thèse sont les suivants :

- Investiguer une approche alternative de micro-fabrication pour la réalisation de formes arbitraires de quelques micromètres dans une résine photosensible : la lithographie grayscale.
- Création d'un algorithme de génération de masque grayscale qui retourne le masque grayscale optimal compte tenu d'une géométrie visée, et de conditions de procédé fixées.
- Explorer les possibilités offertes par la lithographie grayscale : réalisation de matrices de microlentilles pour des pixels de $1.4\mu\text{m}$, de matrices de microlentilles à deux tailles ($1.4\mu\text{m}$ et $0.7\mu\text{m}$), de forme pyramidales, coniques, en escalier...

Ce manuscrit de thèse est divisé en 6 chapitres.

Le premier chapitre propose une introduction à la photolithographie. Après une revue rapide des différentes étapes de réalisation d'un circuit en microélectronique classique, une description complète des équipements de photolithographie sera fournie. Les différentes technologies seront présentées chronologiquement jusqu'à la lithographie par projection, utilisée dans le cadre de cette thèse. Les aspects optiques et résine relatifs à cette technique seront décrits en détail afin de préparer le lecteur au contenu du chapitre 3.

Le second chapitre est consacré à l'état de l'art de la micro-fabrication en 3 dimensions. Deux grandes familles de procédés seront présentées : les techniques utilisant un support physique (masque) pour transmettre l'information de forme et celles n'utilisant pas de support physique. Un attachement particulier sera apporté à la lithographie grayscale à travers l'évolution des méthodologies et des approches utilisées pour construire un masque en fonction d'une micro-structure donnée.

Le troisième chapitre traite des modèles développés durant la thèse afin de simuler le procédé de lithographie. Deux modèles seront présentés : le modèle optique et le modèle résine (lui-même composé d'un modèle d'exposition et d'un modèle de développement). Le rôle du modèle optique est de calculer l'image aérienne. Cette dernière correspond à l'intensité lumineuse reçue par la résine en son sommet au cours de l'exposition. Les hypothèses permettant d'aboutir à la formulation mathématique de l'image aérienne en fonction d'un masque et de conditions d'illumination seront argumentées et justifiées. Deux implémentations numériques seront comparées (l'approche d'Abbe et d'Hopkins) afin de déterminer la plus adaptée aux besoins de la thèse. Les modèles d'exposition et de développement seront décrits à la suite. Ces trois modèles combinés permettent de simuler la totalité du procédé de photolithographie.

Le quatrième chapitre décrit la réalisation et l'exploitation d'un premier masque grayscale. Ce masque réalisé en début de thèse sans connaissance des procédés remplit plusieurs objectifs. Le premier est d'évaluer la capacité des approches de l'état de l'art à adresser les microstructures aux dimensions d'intérêt de la thèse. Ce masque permettra également d'étudier la réponse de deux résines sélectionnées pour leurs formulations chimiques adaptées la lithographie grayscale. Enfin, les profils résines obtenus avec ce masque permettront la calibration du modèle

de développement évoqué précédemment. Le but de cette calibration est de déterminer les paramètres du modèle de développement adaptés à notre procédé et permettant de décrire au mieux les profils expérimentaux observés.

Le cinquième chapitre traite des algorithmes d'optimisation de masque développés afin de permettre la réalisation de microstructures aux dimensions d'intérêt en lithographie grayscale. La position et la taille des plots d'un masque initial seront optimisés simultanément de manière à fournir un profil résine se rapprochant au mieux d'un profil cible. Chaque aspect de l'optimisation sera détaillé et illustré. La seconde partie du chapitre présentera des profils expérimentaux obtenus avec des masques résultants de l'optimisation. La qualité des profils sera évaluée par l'intermédiaire de mesures en Atomic Force Microscopy (AFM) et d'images SEM. Ces derniers permettront de conclure sur les capacités de l'optimisation de masque.

Le dernier chapitre conclut ce travail de thèse et propose plusieurs axes d'améliorations et de perspectives afin de le poursuivre.

Chapitre 1

Introduction à la photolithographie

Résumé du chapitre

La totalité des circuits électroniques actuels utilisent des puces pour traiter des informations. Ces puces sont constituées d'un réseau de plusieurs millions de transistors inter-connectés qui réalisent des fonctions complexes. Cette structure est fabriquée couche par couche à partir d'un substrat de silicium brut. Le nombre d'étapes de fabrication dépend de la technologie. On parle de nœud technologique pour décrire la dimension des transistors du circuit ¹. Le nombre d'étapes peut atteindre plusieurs centaines sur les nœuds les plus avancés (aux plus petites dimensions). Le procédé le plus critique utilisé au cours de ce flux de procédé (enchaînement des étapes de procédé : *process flow*) est la photolithographie.

La photolithographie consiste à transférer des motifs dessinés sur un masque dans une résine photosensible (préalablement étalée sur le substrat) par l'intermédiaire d'un rayonnement ultraviolet. Les résines photosensibles sont des matériaux organiques polymères qui subissent des réactions chimiques lorsqu'elles sont soumises à un éclairage. Le rôle du masque est d'imposer une modification d'amplitude et de phase à une onde lumineuse le traversant de manière à exposer ou non certaines parties de la résine. Après exposition, la résine est retirée sélectivement par l'intermédiaire d'un développeur liquide : les zones exposées rendues solubles sont retirées alors que les zones non exposées sont conservées ². Les zones du substrat recouvertes par la résine sont donc «protégées» du traitement suivant. Les traitements possibles sont variés : gravure, implantation ionique, dépôts de métaux... La résine revêt donc un rôle protecteur provisoire. Une fois le traitement réalisé, elle est retirée de manière à passer à l'étape suivante.

Ce chapitre débute par une introduction à la loi de Moore qui prédit l'évolution de la densité de transistor dans les puces électroniques. Dans un second temps, les principales étapes d'un flux de procédé en microélectronique seront présentées. Enfin, une description de l'évolution des systèmes de photolithographie sera donnée pour aboutir au système utilisé dans le cadre de cette thèse : la lithographie par projection. Les notions clés relatives à l'optique et à la résine en photolithographie seront détaillées.

1. Il s'agit de la taille de grille du transistor qui contrôle le passage des électrons de la source vers le drain.

2. Cas d'une résine positive ici, pour une résine négative, c'est l'inverse.

1.1 Loi de Moore, et de More Than Moore

La loi de Moore est une observation qui stipule que la densité de transistors sur les puces électroniques double tous les 18 mois [Moore et al., 1965]. L'évolution de la densité des transistors et d'autres grandeurs connexes entre 1970 et 2020 sont illustrées sur la Figure 1.1 ci-dessous. L'augmentation de la densité est en grande partie le résultat de l'amélioration des techniques de photolithographie permettant d'obtenir des dimensions de transistor toujours plus fines lors des étapes de fabrication des circuits.

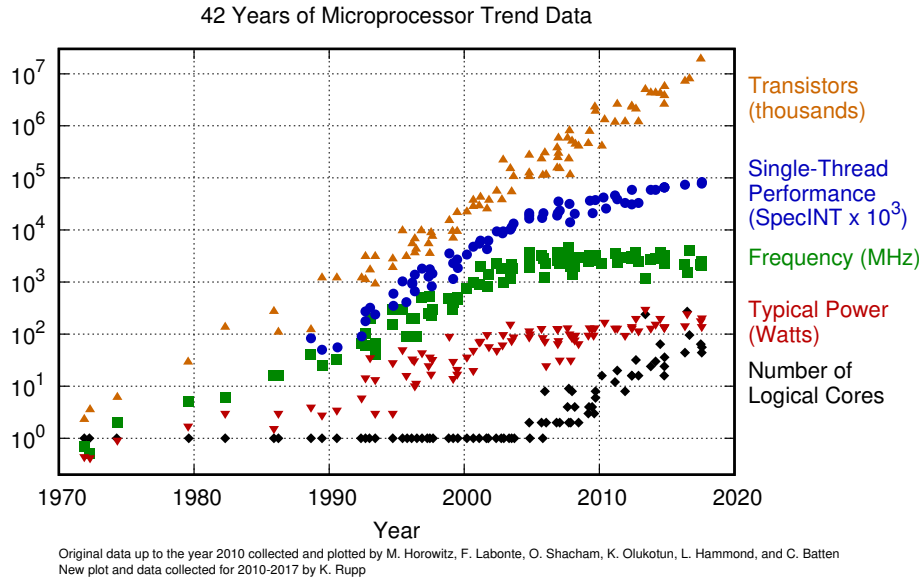


FIGURE 1.1 – La loi de Moore correspond à la courbe orange illustrant l'évolution du nombre de transistors par microprocesseur entre 1970 et 2017 [Rupp, 2018].

La loi de Moore est toujours valide aujourd'hui cependant elle est en permanence remise en question alors que les dimensions des transistors se rapprochent de celles d'un atome. Il n'existe pas de consensus quant à la date à laquelle la loi de Moore prendra fin. La Figure 1.2 ci-dessous illustre différentes dates pour la fin de la loi de Moore en fonction de leur auteur et de la date de la prédiction.

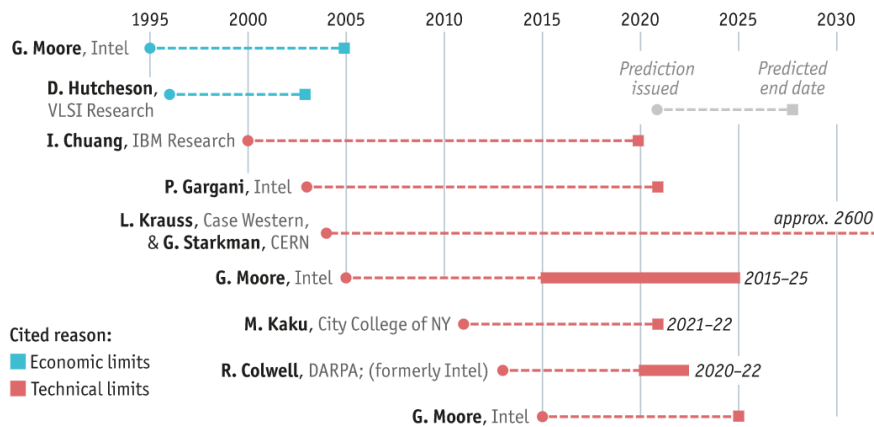


FIGURE 1.2 – Échantillon de plusieurs prédictions relatives à la fin de la loi de Moore [Economist, 2020].

La démarche de l'industrie de la microélectronique est en train de s'inverser [Development, 2018]. La course à la miniaturisation s'arrête progressivement pour laisser place à l'optimisation des matériaux et des architectures dans le but de répondre à des problématiques individuelles par application. Un exemple concret de cette tendance concerne les mémoires 3D NAND qui utilisent un empilement de briques technologiques afin de maximiser les performances des dispositifs à encombrement constant. C'est également le cas des capteurs d'image CMOS discutés dans la partie précédente. Les Microsystèmes électromécaniques (MEMS), l'électronique de puissance ou les applications radio-fréquences sont d'autres exemples. Cette nouvelle tendance porte le nom de «More Than Moore».

Les prochaines sections ont pour but de décrire les différentes étapes essentielles à la réalisation d'un circuit en microélectronique et d'introduire le vocabulaire et notions clés aboutissants à la création d'une puce à partir d'un substrat de silicium brut.

1.2 Étapes de réalisation d'un circuit en microélectronique

Dans cette section, les étapes classiques d'un procédé de fabrication d'un circuit en microélectronique sont décrites par ordre d'utilisation. Les étapes relatives à la photolithographie bénéficieront d'un soucis de détail particulier.

• Préparation du substrat

La contamination des wafers de silicium affecte les performances et les propriétés physiques des circuits. Le nettoyage du substrat est une manipulation importante répétée à plusieurs reprises lors des différentes étapes de fabrication des circuits, afin de supprimer la présence de contaminants à sa surface. Une fois en possession des substrats de silicium, la surface est polie mécaniquement puis chimiquement (Chemical Mechanical Polishing (CMP)) afin de supprimer les défauts de surface.

• Promotion du substrat et étalement de la résine

Avant l'étalement de la résine il peut arriver qu'un promoteur d'adhérence soit appliqué sur le substrat de manière à faciliter l'adhésion de la résine lors de son couchage. En effet, au cours des différentes étapes de fabrication d'un circuit la plupart des surfaces sont des oxydes hydrophiles qui possèdent une faible résistance aux liquides polaires (risque de contamination par l'eau). Le promoteur rend la surface hydrophobe et améliore également l'adhésion de la résine pendant l'étape de développement.

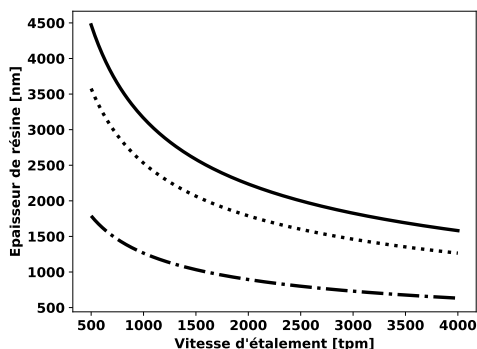


FIGURE 1.3 – Courbes d'étalement à différentes viscosités.

L'étalement de résine se réalise par l'intermédiaire d'une pipette qui dépose une faible quantité de résine au centre du substrat. L'étalement est alors assuré par centrifugation à haute vitesse afin d'uniformiser l'épaisseur de résine sur tout le substrat. Le tracé de l'épaisseur de résine en fonction de la vitesse de rotation est appelé courbe d'étalement (*spin-curve* en anglais). Trois de ces courbes sont tracées sur la Figure 1.3 ci-contre.

L'épaisseur finale de résine, notée e , dépend de la vitesse de rotation du substrat notée ω et d'autres paramètres rassemblés sous le terme k (viscosité résine, durée de centrifugation, volume dispensé, température...).

$$e = \frac{k}{\sqrt{\omega}} \quad (1.1)$$

L'impact du facteur k est évident sur la Figure 1.3 puisqu'à iso-épaisseur la vitesse de rotation varie de plusieurs centaines de tours par minute entre deux résines.

Pour des raisons de simplification nous n'avons traité ici que l'étalement de la résine dans le cas le plus simple : la résine est étalée en une seule étape et la plaque utilisée directement. En réalité plusieurs dizaines d'étapes d'étalement peuvent avoir lieu pour un seul substrat impliquant l'utilisation de multiples solvants et résines avec des temps et vitesses de rotation différents. Enfin, il est intéressant de préciser que le coût de la résine augmente à chaque nouvelle génération d'appareils photolithographiques. Les industriels cherchent donc à minimiser les volumes de résine utilisés.

• Recuit pré-exposition

Une fois l'étalement terminé, la totalité du substrat est chauffée aux alentours de 70 à 100°C par l'intermédiaire de plaques chauffantes. Cette étape est nécessaire pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle permet d'évaporer les solvants encore présents dans la résine (ces solvants peuvent représenter jusqu'à 15% de la masse de résine). Le recuit permet également de réduire les stress mécaniques internes à la résine et d'améliorer l'adhésion entre la résine et le substrat.

• Exposition

L'étape d'exposition consiste à transférer optiquement les motifs présents sur le masque dans la résine. Le masque est illuminé par une source monochromatique de manière à projeter l'image de ce dernier dans la résine par l'intermédiaire d'un système de projection optique. Le système optique est conçu de manière à appliquer un facteur de réduction M entre les motifs sur le masque et ceux transférés. Les motifs sur le masque sont donc M fois plus grands que leur image projetée sur la résine. L'intensité lumineuse reçue par la résine est appelée image aérienne. Elle est le résultat des interactions entre l'illumination et le masque impliquant des phénomènes de diffraction optique et de propagation. Le calcul de l'image aérienne sera détaillé au chapitre 3. L'image aérienne reçue au sommet de la résine se propage dans le volume et va réagir avec les composants photosensibles de la résine en modifiant son taux de dissolution. Les systèmes d'illumination et de projection doivent assurer un transfert le plus fidèle possible entre le masque et le substrat. La durée d'exposition d'un substrat de 300mm est aujourd'hui de 20 secondes pour les appareils de photolithographie avancés.

• Recuit post-exposition

Une fois l'exposition terminée, un recuit thermique peut être nécessaire. Ce dernier s'opère à des températures aux alentours de 100°C pendant une à deux minutes. Il permet de réduire le stress mécanique dans le film de résine en atteignant son point de transition vitreuse et de diffuser les acides formés pendant l'exposition afin de réduire les effets liés aux ondes stationnaires. Les ondes stationnaires se manifestent par la présence d'oscillations verticales dans la résine résultant des réflexions multiples entre l'illumination incidente et les interfaces entre la résine, l'air et le substrat. Ces effets seront illustrés plus loin dans ce chapitre et décrits mathématiquement dans le chapitre 3.

• Développement

Après l'exposition et le recuit post-exposition la résine est présente sous deux états : un état soluble dans le développeur et un non soluble. L'étape de développement consiste à retirer sélectivement la résine par l'intermédiaire d'une solution chimique en fonction du taux de dissolution local de la résine. Le développeur agira différemment selon la polarité de la résine utilisée :

Résine positive : L'interaction résine/photon résulte en une augmentation du taux de dissolution de la résine. En conséquence les zones exposées seront retirées par le développeur.

Résine négative : L'interaction résine/photon résulte en une diminution du taux de dissolution. Les zones non exposées sont alors retirées par le développeur.

- **Hardbake**

Cette dernière étape de traitement thermique (optionnelle) est la plus sévère pour la résine. Le recuit dure environ 30 min pour des températures entre 130 et 200°C. Ce recuit, suivant directement l'étape de développement, va permettre de solidifier la résine et de la rendre plus résistante aux traitements ultérieurs. Le recuit permet l'évaporation des solvants restants. En effet, la gravure et l'implantation ionique sont réalisées sous vide. Il est donc important de préserver cette atmosphère de tout contaminant.

- **Traitement final de la plaque**

Une fois que la résine est solidifiée, l'étape finale est réalisée. Il peut par exemple s'agir d'un dépôt de film métallique qui va venir recouvrir les zones non protégées par la résine. Dans le cadre d'une gravure, l'objectif est de transférer les zones non protégées par la résine dans le substrat : les zones non protégées sont «creusées». Les motifs précédemment définis dans la résine ont vocation à servir de masque dur (*hard mask* en anglais). Un autre exemple est l'implantation ionique qui vise à modifier la conductivité électrique du substrat en le bombardant d'ions afin de modifier la densité d'électrons ou de trous du silicium selon le type de dopage désiré : seules les zones non protégées sont traitées.

- **Retrait de la résine**

Une fois que son rôle de protection a été rempli, la résine n'a plus vocation à rester sur le substrat (exception faite des microlentilles et des filtres colorés discutés dans la partie 0.1.). Elle est retirée en deux temps : un retrait sec (plasma) suivi d'un retrait humide.

1.3 Description des techniques et systèmes de lithographie

Cette section vise dans un premier temps à décrire les différentes approches possibles de la lithographie depuis l'émergence de cette technique dans les années 1960. Les techniques de lithographie par contact, puis par proximité, et enfin de lithographie par projection (photolithographie) seront abordées. Cette dernière est l'approche quasi-universelle utilisée en industrie microélectronique actuellement. Dans une deuxième partie, les différents éléments nécessaires à la compréhension du fonctionnement d'un appareil de photolithographie seront décrits en commençant par la source, le masque, les différentes optiques ainsi que les caractéristiques importantes des résines photosensibles.

1.3.1 Lithographie par contact et proximité

Dans les années 1960-70, deux techniques de lithographie émergent : la lithographie par contact et par proximité. Dans le cas de la lithographie par contact, le masque est conçu à la même échelle que le circuit désiré. Ce dernier est mis en contact directement avec la résine avant d'être exposé dans sa totalité pour assurer le transfert des motifs. Les dimensions atteignables sont typiquement de quelques micromètres. La lithographie par contact est encore utilisée aujourd'hui pour des applications particulières, notamment pour traiter des films de résine épais, des applications MEMS ou de packaging. La lithographie par contact a l'avantage d'être facilement réalisable et ne souffre pas des effets de diffraction du masque qui nuisent au bon transfert optique des motifs. Cependant, elle est limitée par des problèmes de contamination du masque (contact répété avec la résine) et par les résolutions des motifs atteignables. Le substrat étant illuminé dans sa totalité cette technique nécessite un contrôle de la position extrêmement précis. Avec l'augmentation de la taille des substrats, cette condition est devenue de plus en plus difficile à appliquer.

Dans le cas de la lithographie par proximité, la distance entre le masque et la résine est de quelques micromètres (entre 10 et 25 μm). Les effets de contamination sont supprimés mais la résolution est inférieure car le transfert des motifs est affecté par les phénomènes de diffraction optique entre le masque et la résine. La Figure 1.4 ci-dessous présente schématiquement la différence entre les deux techniques :

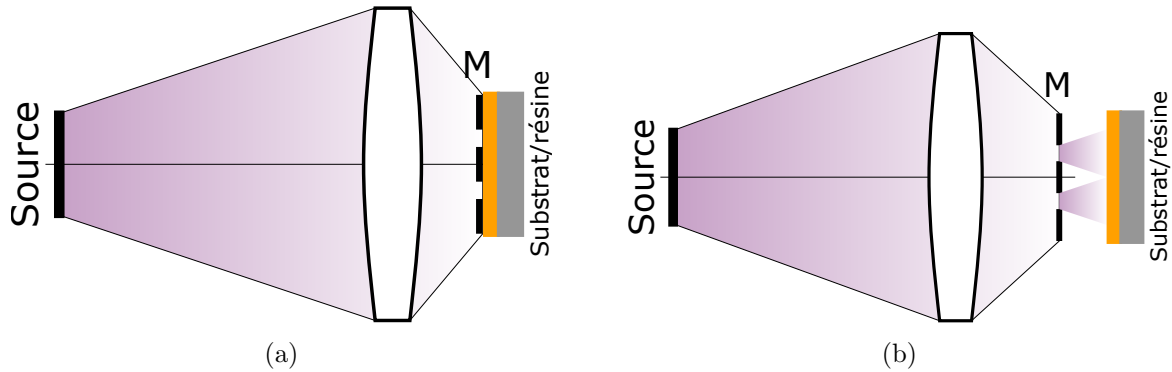


FIGURE 1.4 – Différence entre lithographie par contact 1.4a et par proximité 1.4b. Le masque est noté M.

De par leurs limitations ces techniques ont été progressivement remplacées par la lithographie par projection au début des années 1980 pour la réalisation des circuits intégrés en quantité industrielle.

1.3.2 Lithographie par projection

Dans le cadre de la lithographie par projection, le masque et le substrat sont séparés de plusieurs centimètres, supprimant définitivement les risques de contamination du masque par la résine. Un système optique complexe projette l'image du masque sur le substrat en appliquant un facteur de réduction M , dont la valeur est égale à 2, 4 ou 5 selon le type d'équipement. Cette réduction de l'image du masque permet d'atteindre des résolutions plus fines tout en réduisant la complexité de la création du masque, et donc son coût. La Figure 1.6 ci-dessous est une représentation simplifiée du système de lithographie par projection. Le système est divisé en plusieurs blocs qui seront chacun décrits dans les sections suivantes : un système d'illumination, de projection, un masque et un substrat recouvert de résine.

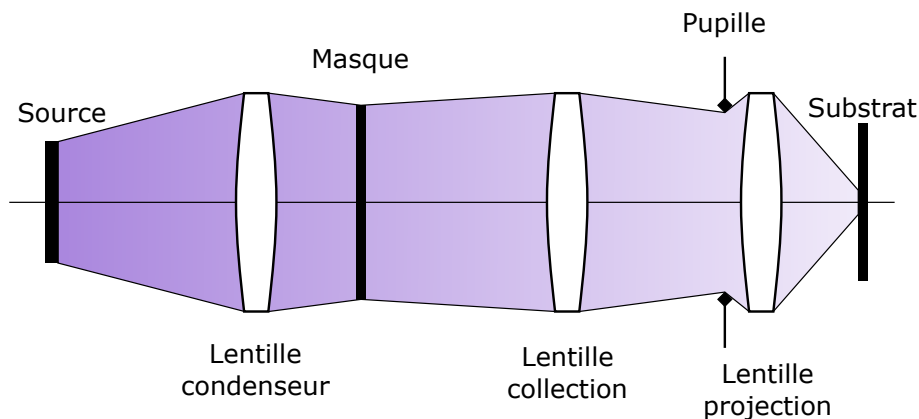


FIGURE 1.5 – Schéma optique simplifié d'un système de lithographie par projection.

Pour un système de lithographie par projection réel, le nombre de lentilles est beaucoup plus

important. À titre d'exemple, la Figure 1.6 ci-dessous présente un schéma optique d'un système de projection où plusieurs dizaines de lentilles sont présentes.

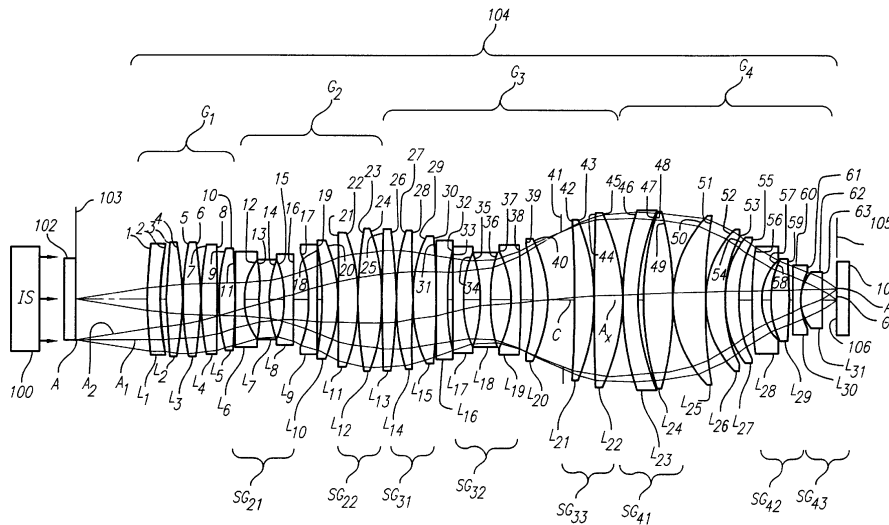


FIGURE 1.6 – Schéma complet d'un système de projection [Mercado, 1999].

Une différence importante avec les techniques de lithographie présentées dans la partie précédente réside dans le fait que le substrat n'est pas exposé dans sa totalité. Ce dernier est divisé en plusieurs champs d'exposition. Ces zones mesurent classiquement 26mm par 33mm et sont répétées sur toute la surface du substrat. Ce choix n'est pas anodin, car il permet de maximiser la surface utile du substrat. Pour un wafer de 300mm cela représente 64 champs soit une utilisation de 98.4% de la surface totale (3 mm sont volontairement exclus sur le bord). D'autres configurations existent avec une couverture moins importante.

Le masque correspond donc à un champ d'exposition d'une ou plusieurs cellules élémentaires du circuit à transférer. L'exposition totale du substrat se fait donc de manière itérative. Selon la technique d'exposition et de déplacement du substrat, on différencie le scanner du stepper :

Stepper (step-and-repeat) : L'image du masque est projetée entièrement sur chaque champ du substrat. Ce dernier se déplace entre chaque exposition pour passer au champ suivant alors que le masque reste en place. On parle de photo-répéteur, ou stepper en anglais.

Scanner (step-and-scan) : Seule une partie du masque est illuminée et projetée sur le wafer. Afin d'exposer un champ en entier, il est donc nécessaire de le balayer avec le système d'illumination. Le masque et le substrat doivent être déplacés simultanément. On parle de photo-répéteur à balayage ou scanner en anglais car le masque est scanné par l'illumination.

En projetant des champs de dimensions plus faibles qu'un stepper, un scanner permet un meilleur contrôle et une correction plus aisée des aberrations optiques. En outre, cela permet également d'utiliser des optiques plus petites et donc moins chères. Dans le cas d'un champ d'exposition de 26mm par 32mm le diamètre de lentille nécessaire pour un scanner est de 26mm contre 41mm pour un stepper.

1.3.3 Source lumineuse

Le système d'illumination a pour rôle de fournir une illumination uniforme sur la totalité de la surface du masque. Afin de respecter cette condition, un arrangement complexe d'éléments optiques (miroirs, lentilles et filtres) est utilisé. La configuration optique permettant une telle illumination, décrite en détail dans la section 1.3.4 est appelée configuration de Köhler.

La source lumineuse doit satisfaire plusieurs conditions. La première est d'être hautement monochromatique de manière à réduire au maximum les aberrations au niveau des optiques. En plus d'être monochromatique, la longueur d'onde recherchée doit être suffisamment petite de manière à pouvoir résoudre optiquement les motifs présents sur le masque. Enfin, afin d'assurer un rendement industriel viable, la source lumineuse doit être puissante de manière à réduire les temps d'exposition nécessaires pour chaque substrat.

La nécessité de réaliser des motifs toujours plus fins a conduit l'industrie microélectronique à rechercher des longueurs d'ondes toujours plus petites. Les premières sources utilisaient une lampe à décharge de mercure dont le spectre d'émission contient deux raies puissantes à 436nm et 365nm. Dès la fin des années 80, le passage aux sources lasers à excimères a permis d'atteindre des longueurs d'onde de 248nm et 193nm à haute intensité. En 2015, ASML après des décennies de recherche introduit la source plasma EUV (extrême ultra-violet). Cette dernière permet d'atteindre une longueur d'onde de 13.5nm. Les équipements permettant l'utilisation d'une telle source commencent à être utilisés industriellement, longtemps retenus par un coût prohibitif et un contrôle de procédé difficile.

Cette course aux faibles longueurs d'onde est directement corrélée au paramètre le plus important d'un procédé photolithographique : sa résolution, notée R . La définition mathématique de la résolution s'inspire du critère de résolution défini par Rayleigh. Historiquement, ce critère définit la séparation minimale entre deux points sources permettant de les distinguer à travers un système optique limité par la diffraction. Selon ce critère les deux points sources sont considérés comme résolus si le premier maximum de diffraction de l'un correspond au premier minimum de l'autre (en terme de tâche d'Airy). Cette distance est notée $R^{Rayleigh}$:

$$R^{Rayleigh} = 1.22\lambda \frac{f}{D} \quad (1.2)$$

où D est le diamètre de la lentille, f sa distance focale et λ la longueur d'onde. En notant que $NA = n \sin(\arctan(\frac{D}{2f})) \approx n \frac{D}{2f}$ le critère est «adapté» au cas de la photolithographie comme suit :

$$\boxed{R = k_1 \frac{\lambda}{NA}} \quad (1.3)$$

où λ correspond à la longueur d'onde du scanner, NA l'ouverture numérique de la lentille de projection et k_1 une constante qui dépend des paramètres physiques de la résine et du système de projection (le système de projection est décrit dans la section 1.3.6). Ce paramètre est déterminé expérimentalement et se situe entre 0.2 et 1. Il faut interpréter la résolution comme une figure de mérite indiquant la taille de motif minimale réalisable dans la résine pour une configuration photolithographique donnée.

La Figure 1.7 ci-dessous regroupe par ordre chronologique les différents types de sources utilisées en photolithographie ainsi que leur année d'introduction. Les valeurs de longueur d'onde, d'ouverture numérique typique et de résolution sont renseignées pour chaque génération.

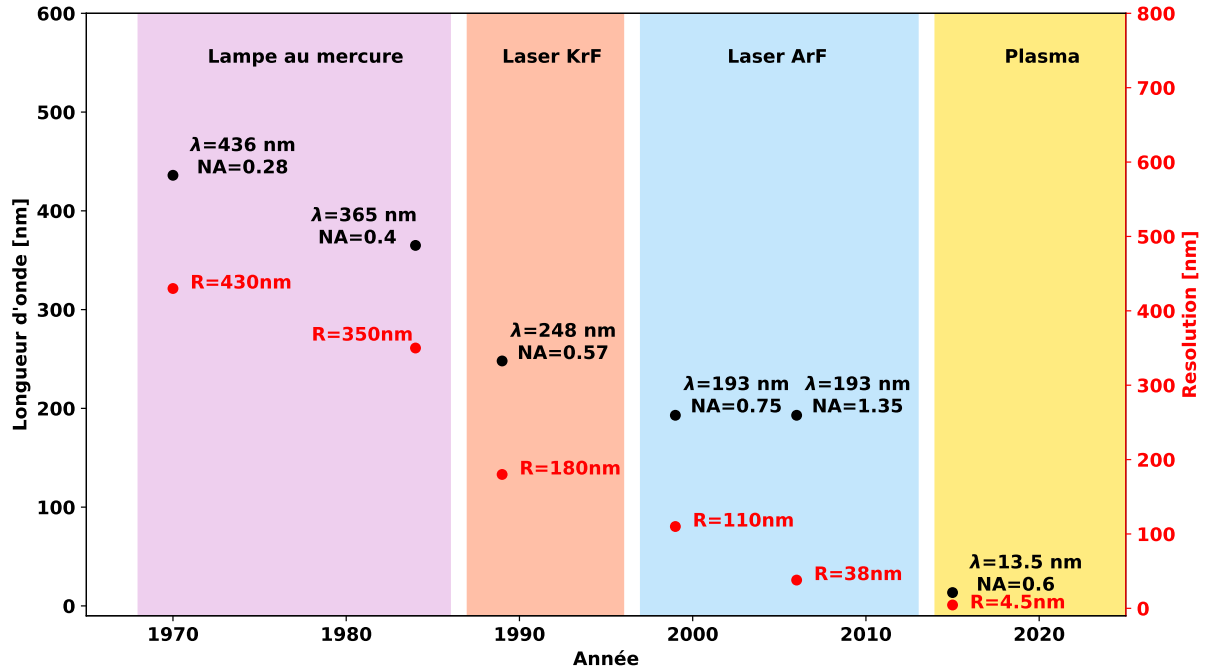


FIGURE 1.7 – Évolution des types de sources utilisées en photolithographie et de la résolution. La longueur d'onde et l'ouverture numérique NA (typique du système) est donnée pour chaque génération de source.

La formule (1.3) indique qu'une diminution de la longueur d'onde d'exposition ou une augmentation de l'ouverture numérique permettent de gagner en résolution. La longueur d'onde a diminué à chaque nouvelle génération de stepper mais au prix d'efforts de développement conséquents. L'augmentation du NA est également bornée par des contraintes physiques, qui n'ont pu être repoussées que par l'introduction de la lithographie par immersion où un liquide est introduit entre la lentille de projection et la résine. En utilisant de l'eau ultra pure avec un indice de réfraction de 1.44 il est possible d'atteindre une valeur pour NA de 1.35.

L'illumination est caractérisée par le *facteur de cohérence* σ , qui est une manière de quantifier l'étendue spatiale de la source et donc l'ensemble des angles possibles des rayons lumineux illuminant le masque relativement à l'axe optique. Dans le cas où la source est circulaire, le facteur de cohérence est défini comme le rapport entre l'ouverture numérique de la lentille du condenseur sur celle de projection (les pupilles des lentilles sont toutes circulaires) :

$$\sigma = \frac{NA_{cond}}{NA} \quad (1.4)$$

Il convient à ce stade du manuscrit de rappeler les différentes définitions de la cohérence dans le cadre physique et en quoi la notion de cohérence en photolithographie est différente. La cohérence regroupe l'ensemble des propriétés de corrélation d'un système ondulatoire. La cohérence peut être définie d'un point de vue *temporel* et *spatial*.

Notions de cohérence temporelle et spatiale

- **Cohérence temporelle** : la cohérence temporelle est une mesure de la corrélation entre une onde et une réplique d'elle-même retardée d'un temps τ . La cohérence temporelle renseigne sur la nature spectrale de la source. Une source est dite cohérente si elle est purement monochromatique (unicité de la longueur d'onde). La grandeur caractérisant la cohérence temporelle d'une source est son *temps de cohérence* $\tau_c = \frac{1}{\Delta\nu}$ où on a noté $\Delta\nu$ la largeur spectrale de la source. Ce temps de cohérence renseigne sur la durée pendant laquelle une onde n'est pas affectée par une copie d'elle-même. Une source parfaitement monochromatique ($\Delta\nu = 0$) présente un temps de cohérence infini. Ce phénomène peut être mis en évidence dans un interféromètre de Michelson où une onde est combinée avec une copie d'elle-même retardée d'un temps τ .
- **Cohérence spatiale** : la cohérence spatiale d'une source décrit la capacité de chaque point de la source à interférer avec les autres points sources. L'expérience des fentes d'Young, en faisant interférer deux ondes spatialement cohérentes entre elles, permet de mettre en évidence ce phénomène avec la formation de franges d'interférences. Si la fente était illuminée par une source incohérente il n'y aurait pas de phénomènes d'interférences au plan d'observation, l'intensité observée correspondrait à la somme des intensités produites par chaque point de la source.
- **Incohérence** : Dans le cas où la source ne présente pas de cohérence spatiale ou temporelle, on parle de source incohérente. L'intensité totale reçue par un détecteur est égale à la somme de chaque intensité individuelle des points sources.

En photolithographie la source est cohérente temporellement mais pas spatialement. L'intensité lumineuse observée au niveau du substrat est la somme des contributions de chaque point source à l'image finale. Toujours en se plaçant dans le cadre d'une source circulaire, on parle de :

- Source incohérente lorsque $\sigma = \infty$, (source circulaire de rayon infini avec une infinité de points sources).
- Source parfaitement cohérente lorsque $\sigma = 0$ (source circulaire de rayon nul avec un seul point source forcément cohérent avec lui-même).
- Source partiellement cohérente lorsque $0 < \sigma < \infty$.

En pratique, les facteurs de cohérence σ en lithographie s'étendent de 0.2 à 0.9 [Wong, 2001]. Cela signifie d'après la formule (1.4) que l'ouverture numérique de la lentille de condenseur est plus faible que celle de la lentille de projection.

La Figure 1.8b permet d'appréhender l'impact du facteur de cohérence sur l'image aérienne dans le cas d'un masque type Heavyside calculé avec le modèle optique présenté au chapitre 3.

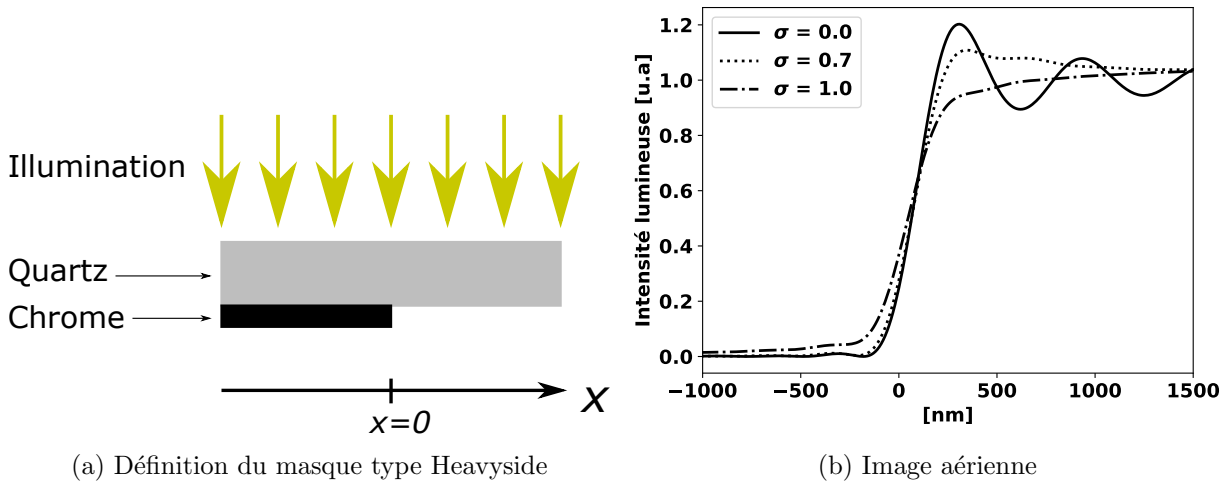


FIGURE 1.8 – Impact du facteur de cohérence sur l'image aérienne d'un masque de type Heavyside avec illumination circulaire. $\lambda=365\text{nm}$, $\text{NA}=0.57$.

On remarque que pour une valeur de cohérence nulle, l'image aérienne présente un phénomène d'oscillation. Ces oscillations se retrouvent dans le profil final de résine après développement. En revanche, pour des valeurs de cohérence plus élevées le transfert est plus fidèle. Il n'existe pas une valeur de cohérence parfaite. En réalité, la cohérence est intimement liée à la géométrie de la source. Cette dernière est choisie en fonction du type de motif à transférer dans la résine. Plusieurs géométries de sources sont visibles sur la Figure 1.9 ci-dessous :

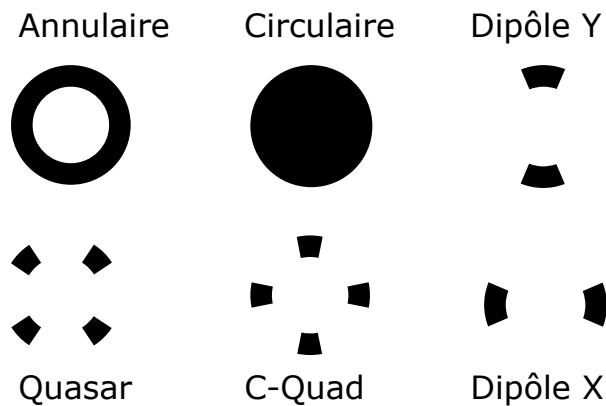


FIGURE 1.9 – Différentes géométries de source.

Par exemple, pour la source annulaire, deux valeurs de cohérence permettent de décrire la géométrie : σ_{in} et σ_{out} . Ces valeurs de cohérence correspondent respectivement au rayon intérieur et extérieur définissant l'anneau.

Dans le cadre de cette thèse nous utiliserons exclusivement des sources à géométrie circulaire. La cohérence de la source et son impact sur le transfert des motifs du masque seront abordés en détail dans le chapitre 3. Afin de garantir une uniformité d'illumination du masque, une configuration optique particulière, dite de Köhler est utilisée.

1.3.4 Illumination de Köhler

L'illumination idéale en lithographie consiste à utiliser une source spatialement uniforme située juste devant le masque. Le masque serait alors uniformément illuminé : l'intensité lumineuse reçue par chaque point du masque serait identique. Cependant, une telle source n'existe pas. Afin d'obtenir une illumination proche de cette condition idéale, la méthode d'illumination de Köhler est utilisée.

Il est important de noter que la configuration de Köhler n'est pas restreinte au domaine de la lithographie. Cette configuration a été initialement proposée par [Köhler, 1893] pour la microscopie optique. Auparavant, une illumination dite critique était utilisée dont le défaut principal était de projeter l'image de la source sur le même plan que l'image de l'échantillon observé. La source était donc visible en plus de l'échantillon ! De plus, l'image observée souffrait des inhomogénéités d'illumination de la source : un point source plus ou moins lumineux que les autres impactait l'image. Ce défaut est corrigé par l'illumination de Köhler par l'introduction d'une lentille entre la source et le masque. Cette dernière assure une illumination homogène de la surface du masque par tous les points sources (lissage des inhomogénéités).

Dans le cas de la lithographie, chaque point de la source émet des rayons dans toutes les directions de l'espace. Sur la Figure 1.10 le trajet lumineux de trois points sources est tracé pour plusieurs rayons : vert, rouge et bleu. La configuration de Köhler va faire en sorte que l'ensemble des rayons non parallèles émanants d'un point source émergent de la lentille du condenseur parallèlement. Pour cela la source est placée au point focal objet de la lentille de condenseur (noté f_c).

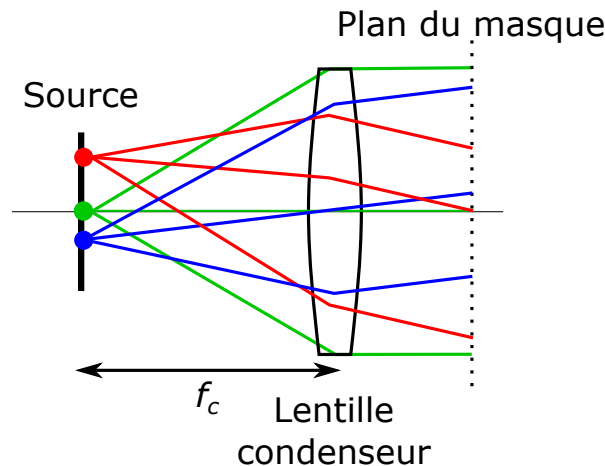


FIGURE 1.10 – Configuration Köhler : plusieurs rayons issus d'un même point source émergent de la lentille de condenseur parallèlement de manière à illuminer uniformément le masque. La position du point source détermine l'angle d'incidence des rayons sur le masque.

L'angle d'incidence des rayons sur le masque relativement à l'axe optique dépend de la distance séparant le point source de l'axe optique. Plus le point source est éloigné de l'axe optique plus l'angle d'incidence sur le masque est élevé. Sur la Figure 1.10 le point rouge est le plus éloigné de l'axe optique. L'illumination qu'il engendre sur le masque possède un angle supérieur à l'illumination du point bleu, lui situé plus proche de l'axe optique. Le point source vert situé sur l'axe optique crée quant à lui une illumination directement parallèle à l'axe optique. Chaque point source va donc illuminer le masque de manière homogène. Ce faisant les effets de vignettage³ sont minimisés et il sera possible d'obtenir une illumination quasiment uniforme.

3. Le vignettage correspond à la perte d'intensité lumineuse en périphérie de l'image, effet observable en photographie.

En réalité, on remplace les effets de vignettage spatiaux par un vignettage angulaire : le masque est uniformément éclairé spatialement mais avec une distribution angulaire liée à l'uniformité d'éclairage de la pupille de la première lentille.

Une autre propriété de la configuration de Köhler est de créer une image de la source au niveau de la pupille d'entrée de la lentille de projection en l'absence de masque par l'intermédiaire d'une lentille de collection positionnée de manière à faire coïncider son plan focal objet avec le plan du masque. L'image de la source sur ce plan est appelée source effective. Chaque point de la source effective correspond à une onde plane incidente à un certain angle sur le masque. La formation de la source effective est schématisée sur la Figure 1.11 ci-dessous.

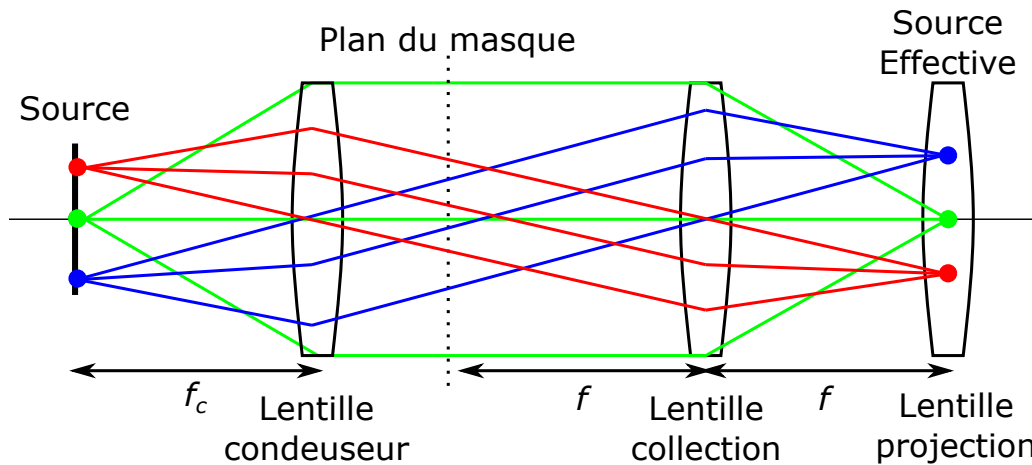


FIGURE 1.11 – Configuration Köhler : en l'absence de masque, la source est imagée au niveau de la pupille d'entrée de la lentille de projection par l'intermédiaire d'une lentille de collection. La pupille d'entrée est ici enterrée dans la lentille.

Un autre effet de la lentille de collection est de ramener le champ de diffraction lointain du masque à distance finie, précisément au niveau de la pupille d'entrée de la lentille de projection. Cette propriété démontrable dans le cadre de l'optique de Fourier sera argumentée dans le chapitre 3. Cette propriété facilite le calcul de la figure de diffraction, puisque la formulation de Fraunhofer peut être utilisée au lieu de celle de Fresnel (7.1). La figure de diffraction est directement proportionnelle à la transformée de Fourier du masque. Les différents régimes de diffraction sont rappelés en Annexe 7.1.

Au final l'image de la source et la figure de diffraction du masque sont donc projetées sur le même plan. Cette configuration permettra de simplifier la description du système optique lors de la dérivation des équations de l'image aérienne au chapitre 3.

1.3.5 Masque

Les motifs sur le substrat sont une reproduction de ceux sur le masque. La qualité des motifs dépend donc directement de la qualité d'écriture de ceux inscrits sur le masque. Par conséquent, le masque est un élément crucial en photolithographie et sa réalisation n'est achevée qu'après plusieurs étapes d'inspections et de corrections très strictes.

Les masques sont fabriqués via des techniques similaires à celles des substrats. Le point de départ de la fabrication d'un masque est appelé : «blank». Il s'agit d'une structure constituée d'un empilement de trois couches : quartz, chrome et résine. Un fichier contenant les motifs à écrire sur le masque est fourni au fabricant (fichier GDSII, Mebes, OASIS) qui utilise une machine d'écriture à faisceau électronique pour exposer la résine. Cet équipement utilise des électrons à la place de photons. La limite de diffraction des électrons étant bien plus basse que

celle des photons, la finesse de détail atteignable est donc supérieure, avec en contrepartie un temps d'écriture plus long. Certains masques aux motifs moins critiques peuvent être réalisés avec un faisceau laser, moins précis mais plus rapide et moins coûteux d'utilisation. Une fois l'exposition terminée, la résine est développée. La dernière étape consiste à graver les zones non protégées par la résine afin d'obtenir le masque final.

Dans tous les cas, le fabricant de masque communique les capacités de ses équipements d'écriture lors de la commande d'un masque. Ces capacités sont résumées dans une liste de règles appelée Mask Rules Check (MRC). Les principales règles concernent la dimension minimale réalisable d'un carré de chrome (Minimum Critical Dimension (minCD)) et l'espace minimum entre deux éléments de chrome (Minimum Space Dimension (minSPACE)).

La Figure 1.12 présente les différentes familles de masque existantes : binaire ou COG (pour *chromium on glass*) et les PSM (*phase shifting mask*). Le masque contient les informations concernant les motifs à transférer sous forme de variation de transmittance et/ou de phase à l'illumination issue de la source.

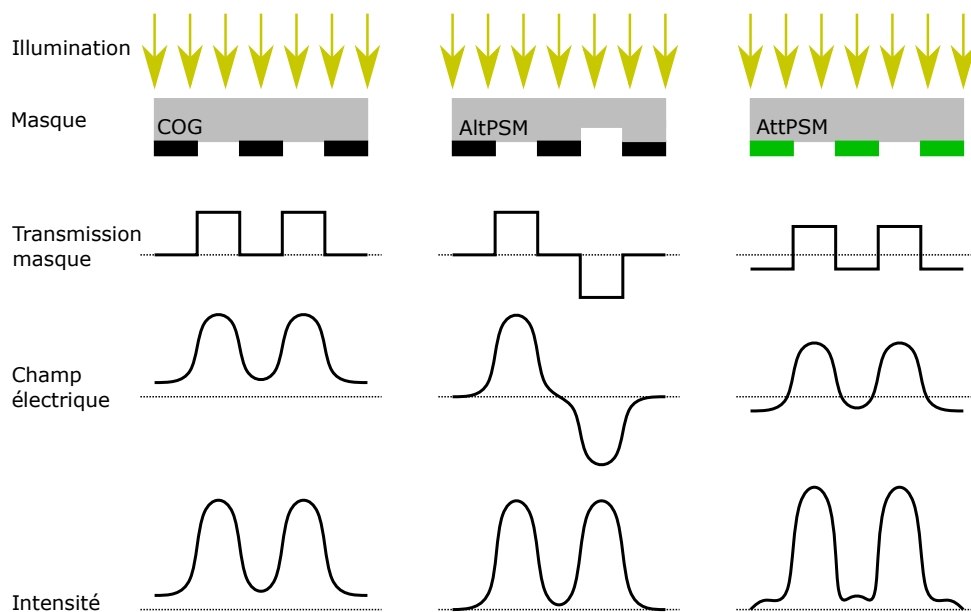


FIGURE 1.12 – Illustration des différents types de masque utilisés en photolithographie. La transmission du masque, le champ électrique et l'intensité lumineuse reçue par la résine sont tracés.

Les masques binaires sont constitués d'un substrat transparent recouvert d'un film opaque définissant les motifs désirés. La lumière arrivant sur le masque peut le traverser au niveau du substrat transparent ou être complètement stoppée par les zones opaques. Ce type de masque vise donc seulement à modifier l'amplitude de l'onde lumineuse le traversant. Le film opaque est réalisé à partir de chrome avec des épaisseurs typiques de 70nm mais peut aussi être du siliciure de molybdène (OMOG) qui permet d'affiner l'épaisseur jusqu'à quelques nanomètres.

Les masques à changement de phase (PSM) modulent la phase en plus de l'amplitude du champ les traversant. Cette double modulation permet d'améliorer le contraste de l'image en jouant sur les phénomènes d'interférences destructives et constructives. Le premier type de masque PSM est le masque à changement de phase alternatif (AltPSM) où le substrat est localement gravé à une profondeur particulière de manière à imposer un déphasage à 180° ⁴. Ce type de masque est illustré sur la Figure 1.12 au milieu (la transmission inversée correspond

4. Le fabricant de masque réalise donc une seconde fois un dépôt de résine, exposition, développement et gravure du masque.

au déphasage de 180°). L'autre type de masque est le masque à changement de phase atténué (AttPSM) qui fait appel à un élément absorbeur partiel comme le siliciure de molybdène dont le taux de transmission est de 6% et le déphasage imposé à l'onde de 180° . La difficulté vient du contrôle de la profondeur de gravure dans le substrat pour l'AltPSm et de l'épaisseur d'absorbeur pour l'AttPSM.

Au cours de cette thèse nous n'utiliserons que des masques binaires COG. La propagation de la lumière à travers ce type de masque est perturbée par la présence des motifs de chrome. Ces effets sont décrits par la théorie optique de la diffraction. La diffraction décrit le phénomène affectant les ondes (pas nécessairement lumineuses) lorsque ces dernières rencontrent un obstacle au cours de leur propagation.

1.3.6 Système de projection

Le système de projection a pour objectif de projeter l'image du masque sur le substrat tout en lui appliquant un facteur de réduction. Le système de projection, souvent simplifié dans la littérature sous la forme d'une seule lentille, est en réalité un arrangement complexe de lentilles (jusqu'à 40), filtres et diaphragmes. L'image projetée par la lentille de projection est dépendante des phénomènes de diffraction du masque et des capacités d'imagerie de la lentille de projection. La Figure 1.13 ci-dessous illustre le cône d'acceptance d'une lentille défini par l'angle U . Les rayons lumineux se propageant dans ce cône sont captés par la lentille et participent à la formation de l'image.

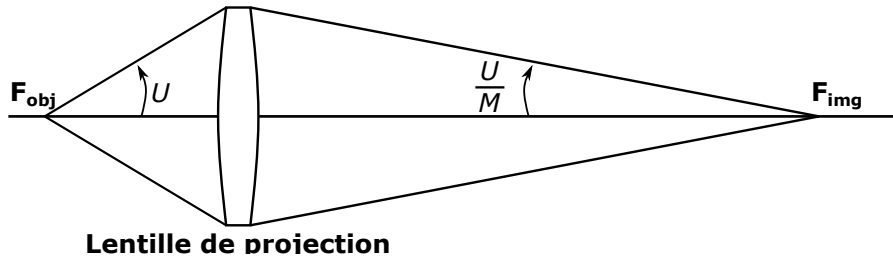


FIGURE 1.13 – Définition du cône d'acceptance d'une lentille.

L'ouverture numérique, notée NA, compète cette description en prenant en compte l'indice de réfraction du milieu, n selon la formule suivante :

$$NA = n \sin U \quad (1.5)$$

Cette équation est valable du côté objet de la lentille de projection. L'angle d'acceptance côté image est M fois inférieure à cause de l'effet de grandissement.

Lors de l'exposition, la diffraction se manifeste par une modification de l'amplitude et de la phase de l'onde lumineuse lors de la traversée du masque. Un exemple classique de diffraction est celui du réseau périodique dont on observe le champ à longue distance (régime de diffraction de Fraunhofer). Ce type de réseau correspond à une structure couramment étudiée en lithographie : le réseau ligne/espace égal (la largeur des lignes est égale à celle des espaces). Lorsque ce dernier est illuminé par une onde plane monochromatique à incidence normale, l'étude de la figure de diffraction révèle l'existence de m maximums d'intensité dont l'écart angulaire à l'axe optique θ dépend du pas du réseau (sa période) g , de la longueur d'onde d'exposition λ , et de l'ordre de diffraction m à travers la formule de Bragg :

$$\boxed{n \sin \theta = m \frac{\lambda}{g}} \quad (1.6)$$

Chacun des pics d'intensité de la figure de diffraction d'un réseau correspond à une fréquence que l'on retrouve dans le réseau lui-même. Le premier pic correspond au pas du réseau, et les pics suivants aux harmoniques supérieures. Deux réseaux à pas différents sont illustrés sur la Figure 1.14 ci-dessous.

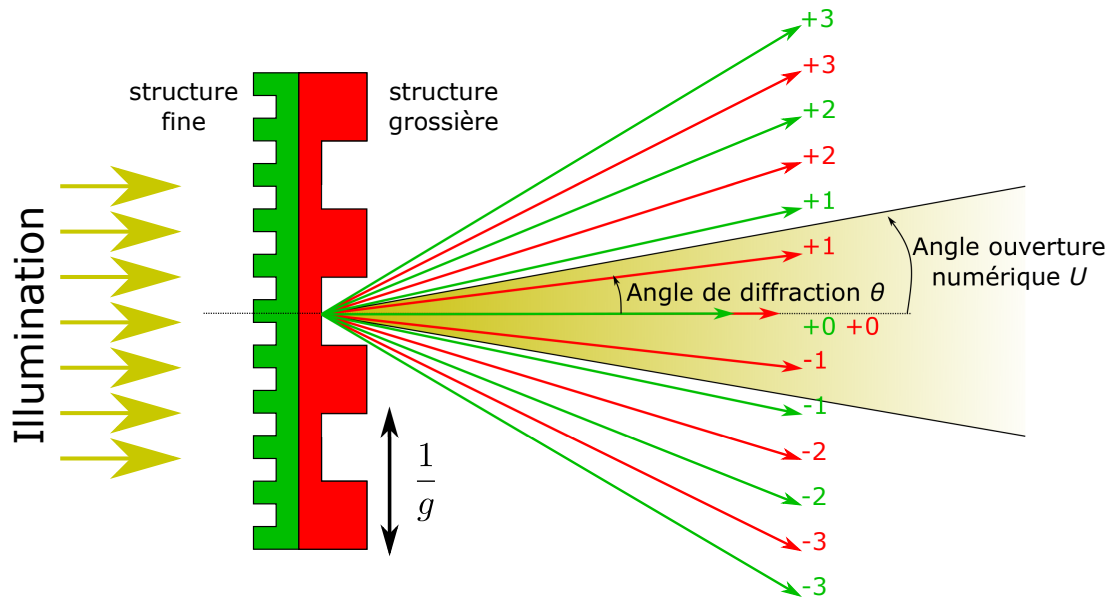


FIGURE 1.14 – Ordres de diffraction de deux réseaux périodiques illuminés par une onde plane monochromatique perpendiculairement à la surface du masque. L'angle d'acceptance angulaire de la lentille de projection est noté U . [Gross, 2005]

Le réseau dessiné en vert (structure fine) possède un pas plus petit que le réseau rouge (structure grossière). Les ordres de diffraction pour ces deux réseaux sont dessinés sous formes de flèches de la même couleur. Le pas du réseau vert étant plus faible, la position des pics d'intensité est située à un angle θ supérieur aux pics d'intensité issus du réseau rouge. La lentille de projection n'est en mesure de capter que les ordres de diffractions contenus dans son cône d'acceptance angulaire U . Pour le réseau vert, seul l'ordre 0 est capté alors que le réseau rouge voit les ordres 0, 1 et -1 être collectés.

Dans le cadre de l'optique de Fourier, les pics d'intensité observés en champ lointain correspondent au spectre du masque, c'est-à-dire sa décomposition en fréquences par transformée de Fourier. Les composantes du spectre du masque représentent les détails présents sur le masque à une certaine taille. L'ordre zéro correspond à la fréquence nulle, tandis que le premier ordre de diffraction correspond à la période du réseau à la fréquence $\frac{1}{g}$, le second à $\frac{2}{g}$ et ainsi de suite. En résumé l'optique de Fourier permet de relier la propagation d'un rayon lumineux diffracté à un certain angle θ à une fréquence spatiale f contenue dans le masque selon l'équation suivante (1.7) :

$$n \sin(\theta) = \lambda f \quad (1.7)$$

Dans le cadre de la lithographie l'exemple de la Figure 1.14 est intéressant car didactique, mais il n'est pas représentatif de la réalité, et ce pour trois raisons. Tout d'abord le masque n'est pas seulement illuminé par une seule onde plane mais par un spectre d'ondes planes incident à différentes angularités sur le masque (à cause de la cohérence de la source). De plus, les structures sur le masque sont beaucoup plus variées et complexes que de simples réseaux infinis. Enfin, le spectre du masque étant situé à l'infini il est nécessaire de le ramener à distance finie.

La Figure 1.15 ci-dessous présente l'agencement des lentilles du système de lithographie par projection. La figure de diffraction du masque (son spectre), normalement projetée à l'infini, est ramenée au niveau de la pupille d'entrée de la lentille de projection par un agencement de lentilles, simplifié sous la forme d'une lentille de collection. C'est la configuration de Köhler déjà abordée précédemment. La pupille d'entrée de la lentille de projection fait office de filtre fréquentiel passe-bas pour le spectre du masque. Les rayons se propageant avec un angle θ supérieur à l'angle U du cône d'acceptance défini par l'ouverture numérique de la lentille de projection ne sont pas collectés (ensemble de rayons rouges sur la Figure 1.15).

En revanche, les rayons se propageant plus proche de l'axe optique sont captés et participent à la formation de l'image. Nous verrons au chapitre 3 qu'en appliquant la décomposition en ondes planes, les rayons lumineux associés à des angles élevés peuvent être assimilés aux hautes fréquences spatiales présentes sur le masque.

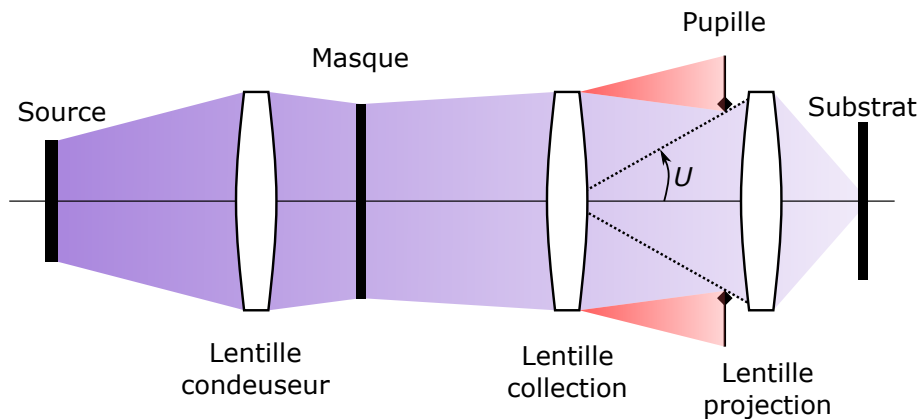


FIGURE 1.15 – Projection de l'image du masque après diffraction avec les motifs de chrome. Les ordres de diffraction élevés ne sont pas captés par la lentille de projection.

Reprenons le cas de la Figure 1.14 décrit précédemment. Afin de recréer une image du masque, la lentille de projection doit être en mesure de collecter à la fois l'ordre zéro et au moins un ordre de diffraction supérieur. Ces ordres interfèrent au plan image de manière à fournir une information relative à la forme structurelle du masque. Le réseau rouge pourra être imagé car les ordres 0, -1 et 1 sont présents dans le cône d'acceptance de la lentille de projection. En revanche, pour le réseau vert, seul l'ordre 0 est présent, aucune interférence ne peut avoir lieu, et aucune information relative à la structure du masque n'est transmise.

La fidélité de l'image est directement liée au nombre d'ordres de diffraction collectés par la lentille de projection, et donc à son ouverture numérique. Plus le nombre d'ordres collectés est important, meilleur est le transfert de l'image. La Figure 1.16 ci-dessous illustre l'intensité lumineuse au plan image de la lentille de projection pour 4 conditions de collection d'ordres de diffraction différentes. La longueur d'onde utilisée est de 365nm, la source est cohérente ($\sigma=0$) et le masque utilisé est un réseau Ligne/Espace régulier de largeur de ligne égale à 365nm.

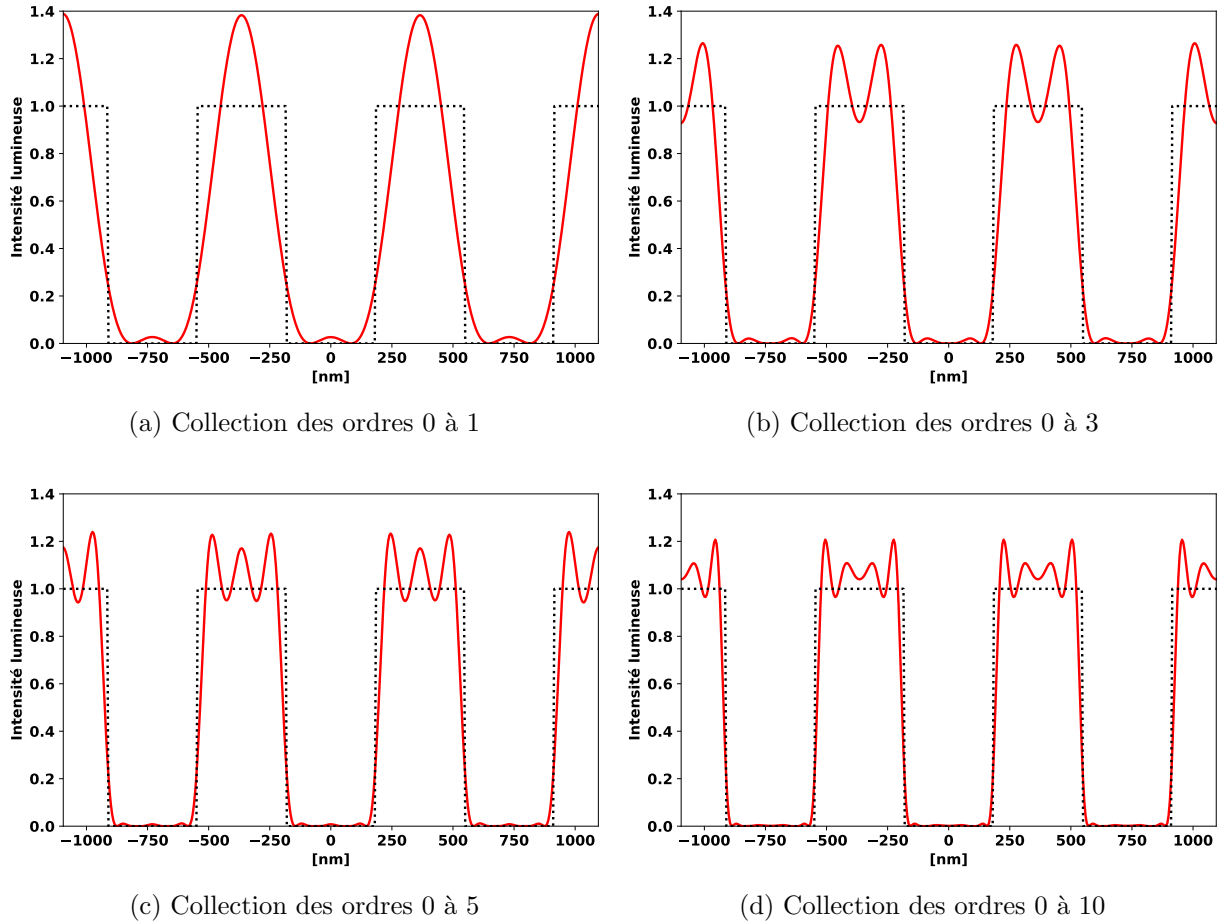


FIGURE 1.16 – Profil d’image aérienne pour un réseau ligne espace régulier à différentes conditions de collection des ordres de diffraction du masque. La structure à transférer est en pointillés noirs, l’image aérienne en rouge.

On remarque qu’en augmentant le nombre d’ordres de diffraction collectés, la qualité du transfert s’améliore. Un système optique parfait (sans aberration) et une lentille avec une ouverture numérique infinie permettrait un transfert parfait.

L’exemple d’un masque à Ligne/Espace régulier n’est pas anodin, il permet de remonter à la formule de Rayleigh adaptée à la lithographie [Mack, 2006]. La fréquence maximale pouvant traverser la pupille de la lentille de projection f_{lim} est obtenue en utilisant la formule (1.7) lorsque $\theta = U$:

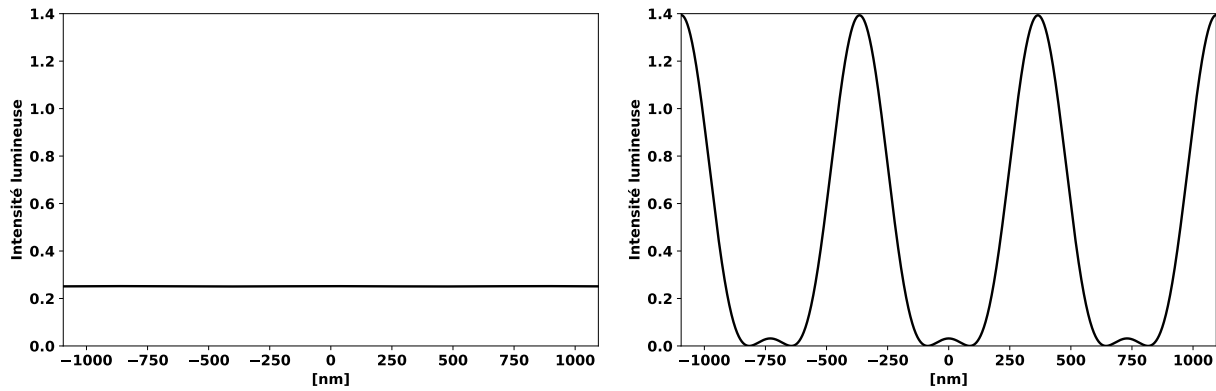
$$f_{lim} = \frac{NA}{\lambda} \quad (1.8)$$

Pour un réseau de ligne/espace égaux, la résolution est égale à la moitié de la période, en notant $p_{lim} = \frac{1}{f_{lim}}$ la période spatiale associée à la fréquence f_{lim} :

$$R = \frac{p_{lim}}{2} = 0.5 \frac{\lambda}{NA} \quad (1.9)$$

C’est bien l’équation de la résolution avec $k_1 = 0.5$.

La Figure 1.17 ci-dessous représente le profil d'image aérienne de deux masques à ligne-espace sous illumination cohérente ($\sigma=0$) afin d'illustrer l'importance de la résolution. La longueur d'onde utilisée est de 365nm, l'ouverture numérique $NA=0.5$. Par conséquent, la résolution est égale à 365nm d'après l'équation (1.9).



(a) Ligne/Espace régulier de période 364nm

(b) Ligne/Espace régulier de période 365nm

FIGURE 1.17 – Profil d'image aérienne, pour deux masques de type Ligne/Espace juste en-dessous et au-dessus de la limite de résolution.

Le passage du régime résolu à celui non résolu est abrupt. On remarque que lorsque le motif n'est pas résolu, un niveau d'intensité non nul est malgré tout transmis. Cette intensité correspond à celle contenue dans l'ordre de diffraction zéro. Le critère R établi en (1.9) suppose des hypothèses fortes (réseau ligne/espace et illumination cohérente), le facteur k_1 est utilisé pour généraliser la formule et obtenir l'équation (1.3).

Le système de projection est l'élément principal affectant la qualité et la résolution d'un procédé lithographique. Chaque nouvelle génération d'équipement va de pair avec une amélioration des performances des lentilles de projection. Cette évolution est résumée dans le Tableau 1.1 ci-dessous qui regroupe plusieurs modèles de systèmes de projection du fabricant Zeiss utilisés par l'équipementier photolithographique ASML pour une longueur d'onde de 193nm.

TABLE 1.1 – Évolution des paramètres des lentilles de projection du fabricant Zeiss. Le suffixe i dans le numéro de modèle indique que le système de projection utilise l'immersion [Bruning, 2007].

Modèle	900	1100	1200	1400	1700i	1900i
Nœud [nm]	130	100	80	65	50	45
NA	0.63	0.75	0.85	0.93	1.20	1.35
k_1	0.42	0.39	0.35	0.31	0.31	0.31

Le nœud ou minCD correspond à la taille du plus petit motif transférable dans la résine. C'est en quelque sorte une évaluation de la résolution donnée en 1.3. L'ouverture numérique connaît une augmentation importante à partir de l'utilisation des lentilles à immersion où un ménisque d'eau ultra-pure vient remplacer l'air, augmentant ainsi l'indice optique n dans la formule 1.5. Pour une longueur d'onde 193nm, l'eau ultra-pure possède un index de réfraction 1.437 [Burnett, 2004]. En parallèle, le facteur k_1 est également réduit même si rappelons-le, ce facteur dépend également de la résine et du développeur utilisé.

1.3.7 Résine

Dans le cadre de cette thèse des résines type Novolak/DNQ seront utilisées. Ces résines sont positives (la région exposée devient soluble dans le développeur) et sont constituées de trois éléments principaux : une base de résine Novolak qui détermine les propriétés structurales et de développement, un composé photo-réactif DiazoNaphthoQuinone (DNQ) qui permet de rendre la résine soluble une fois exposée et un solvant qui permet à ces deux composants d'exister sous forme liquide pour permettre l'étalement de la résine. Ce type de résine a été utilisé par l'industrie micro-électronique (lithographie à 436nm ou 365nm) jusqu'à l'avènement de la lithographie par immersion. Un nouveau type de résine fut alors introduit : les résines à amplification chimique : Chemically Amplified Resist (CAR). Ces résines offrent de meilleures performances pour les nœuds avancés. Aujourd'hui, avec l'introduction de lithographie EUV, de nouveaux défis sur la formulation chimique des résines apparaissent.

L'image aérienne créée par le système d'exposition est projetée sur la résine et se propage à travers son épaisseur. L'intensité de l'image aérienne alors qu'elle se propage dans la résine diminue à cause du phénomène d'absorption (d'autres effets modifient également sa distribution par exemple le defocus). Le degré d'absorption est un paramètre clé de la résine en photolithographie. Si elle est trop faible, le temps d'exposition devra être long ce qui aboutit à une diminution du rendement. Si l'absorption est trop élevée, des différences importantes de développement apparaissent entre le sommet et le bas de la résine, ce qui ne permet pas d'obtenir des profils acceptables.

La sensibilité verticale d'une résine à la dose d'exposition correspond à sa courbe de contraste. Cette courbe relie la hauteur de résine après développement à la dose reçue durant l'exposition. La Figure 1.18 présente deux courbes de contraste, l'une pour une résine positive et l'autre pour une résine négative. Dans le cas d'une résine positive, la résine n'est pas développée lorsque la dose est inférieure à D_0 tandis qu'elle est totalement développée pour une dose supérieure à D_{tc} (pour *dose-to-clear*). Le comportement inverse est obtenu avec une résine négative.

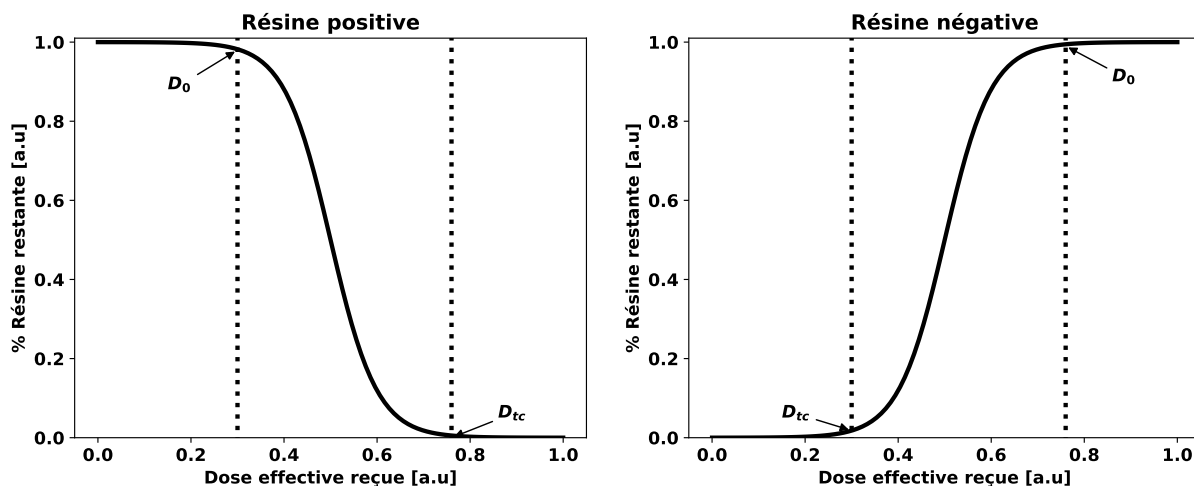


FIGURE 1.18 – Courbe de contraste pour une résine positive et négative.

Le contraste de la résine, noté γ est défini comme la pente de la courbe de contraste entre ces deux doses.

$$\gamma = \frac{1}{\ln(D_0) - \ln(D_{tc})} \quad (1.10)$$

En photolithographie classique, il est préférable de travailler avec des résines à fort contraste qui garantissent une transition rapide entre l'absence de développement et le développement total

de la résine. Le cas idéal est atteint lorsque la courbe de contraste devient une fonction marche, condition atteinte lorsque $D_0 = D_{tc}$ ou de manière équivalente lorsque $\gamma = \infty$.

La courbe de contraste ne fournit qu'une approximation de l'impact du développeur sur la résine : seule la verticalité du développement est prise en compte. Cependant, l'effet du développeur est également horizontal. Nous verrons au chapitre 3 l'impact de cette hypothèse lors de la modélisation du procédé de photolithographie.

La résine n'est que très peu soluble dans le développeur si elle n'est pas exposée. Malgré cela, les zones de la résine non exposées sont lentement retirées lors du développement. Ce phénomène est appelé *dark erosion*. La résine située dans les zones non exposées (sombres) est développée petit à petit. La vitesse de ce phénomène dépend de la résine et du développeur utilisé.

Le substrat et la résine possèdent des propriétés optiques différentes, les ondes traversant la résine sont réfléchies aux interfaces air/résine et résine/substrat et interfèrent avec les ondes incidentes. Ce phénomène aboutit à la génération d'ondes stationnaires (*standing waves* en anglais) dans la résine. Ces ondes stationnaires créent des vaguelettes dans la résine après l'étape de développement. Ce phénomène est visible sur la Figure 1.19.

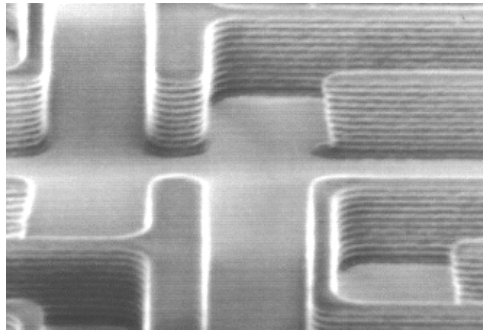


FIGURE 1.19 – Visualisation du phénomène d'ondes stationnaires dans la résine [Mack, 2008].

Il est possible de réduire voire de supprimer complètement l'effet des ondes stationnaires en utilisant des couches anti-réfléctives avec les bonnes épaisseurs et propriétés optiques. Ces couches peuvent être déposées au sommet de la résine, on parle alors de Top Anti Reflective Coating (TARC), ou entre la résine et le substrat. Dans ce dernier cas on parle de Bottom Anti Reflective Coating (BARC). Enfin, le recuit post-exposition permet de lisser les derniers résidus d'ondes stationnaires.

Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre nous avons décrit les étapes clefs de fabrication d'un circuit intégré telles qu'elles existent dans le cadre de la loi de Moore. Le procédé de photolithographie est l'étape la plus fréquente : elle intervient plusieurs dizaines de fois. À chaque fois la résine est utilisée comme intermédiaire. Elle permet de protéger certaines zones du substrat face à un traitement particulier. La résine n'est donc jamais conservée. Un intérêt particulier a été apporté à la description du système optique utilisé en photolithographie et aux concepts de résolution. La bonne compréhension de ces mécaniques est en effet essentielle afin de mieux appréhender les concepts théoriques du chapitre 3 dédié à la modélisation de la photolithographie.

Le choix a été fait de ne pas rentrer en détail dans les aspects de contrôle qualité de la lithographie et des métriques permettant son optimisation. Auraient ainsi pu être abordées les notions de courbe de Bossung, de NILS, de contrôle de focus... Ces aspects ne constituent pas un pré-requis pour la compréhension de cette thèse. Le lecteur intéressé trouvera sans aucune difficulté des ouvrages traitant de ces sujets⁵.

Les microlentilles et les filtres colorés utilisés dans les capteurs d'images font partie des rares exceptions où la résine est conservée sur le substrat. Ces éléments sont réalisés en partie par photolithographie. Les étapes nécessaires à la création de ces structures sortent du cadre conventionnel présenté dans ce chapitre.

Le chapitre suivant propose un état de l'art des techniques existantes permettant la réalisation de microstructures en résine photosensible. Le cas des microlentilles pour les applications imageurs sera notamment abordé dans la section dédiée à la technique de fluage. L'approche retenue pour cette thèse, la lithographie grayscale, sera décrite en détail à travers son historique et ses concepts clefs.

5. Par exemple dans [Mack, 2006] ou [Levinson, 2005]

Chapitre 2

État de l'art : la microfabrication 3D

Résumé du chapitre

Alors que la micro-électronique est aujourd'hui une industrie mature où les résolutions inférieures à 10nm sont atteintes à l'échelle industrielle, ce n'est pas le cas pour la micro et nano-fabrication en trois dimensions. La micro-fabrication en trois dimensions consiste à produire des structures complexes à l'échelle micrométrique dans un matériau polymère pouvant être suivi d'un transfert dans un autre matériau par gravure.

De telles structures trouvent leur application dans des domaines variés qui font partie intégrante de la tendance «More Than Moore» : capteurs MEMS, circuits en micro-fluidique, dispositifs bio-médicaux ou encore micro-optiques. De par la taille et la densité des motifs visés, l'utilisation de la photolithographie est privilégiée mais d'autres techniques de fabrication existent. Le principal défi pour l'industrie est de parvenir à développer des méthodes et procédés permettant de produire des formes de plus en plus petites avec un contrôle sur la forme tant vertical qu'horizontal, tout en maintenant un rendement de production viable.

Cette section vise à fournir un état de l'art des différentes techniques existantes pour la micro-fabrication 3D avec un focus particulier sur la lithographie grayscale qui fait l'objet de cette thèse. Les différentes approches possibles seront divisées en deux grandes catégories : les techniques reposant sur les équipements de photolithographie dites «techniques avec masque» et les autres, «techniques sans masque». Ce travail de thèse s'inscrivant dans un cadre industriel, il est possible que certaines techniques émergentes mais dont le rendement est trop faible ne soient pas abordées.

2.1 Techniques sans masque

Dans cette section nous présenterons deux techniques de microlithographie ne faisant pas appel à la photolithographie. Le choix est fait de se limiter à des techniques qui mettent à profit une exposition à dose variable pour générer des microstructures car elles se rapprochent le plus de la lithographie grayscale utilisée dans le cadre de cette thèse. Par conséquent, certains concepts développés par ces approches peuvent être transposés au cadre du grayscale. D'autres techniques existent mais ne seront pas présentées dans ce manuscrit. le principal défaut de ces techniques est un temps d'écriture beaucoup trop important (lithographie multi-photons, lithographie thermique...).

2.1.1 Micro-miroirs digitaux

La lithographie par Digital Micro-Mirrors (DMD) est une technique de lithographie directe basée sur la modulation d'une dose d'exposition appliquée au film de résine sur le substrat. La modulation d'intensité est réalisée par l'intermédiaire d'une matrice de micro-miroirs dont chaque élément peut être contrôlé individuellement pour modifier sa réflectivité à une illumination incidente. Les systèmes classiques de DMD sont composés d'un matricage de 1024 par 768 miroirs carrés d'environ $10\mu\text{m}$ de côté.

La surface des miroirs est éclairée uniformément. Chaque miroir peut pivoter de manière à réduire ou à augmenter sa réflexion à l'illumination incidente. En utilisant un système de contrôle numérique, il est donc possible de soumettre la résine à une dose variable spatialement. L'architecture d'un système DMD est présentée sur la Figure 2.1 ci-dessous. On retrouve plusieurs éléments en commun avec un appareil de photolithographie, notamment la présence d'une source lumineuse, d'une lentille de projection qui applique également un facteur de réduction avant de projeter l'intensité lumineuse sur la résine.

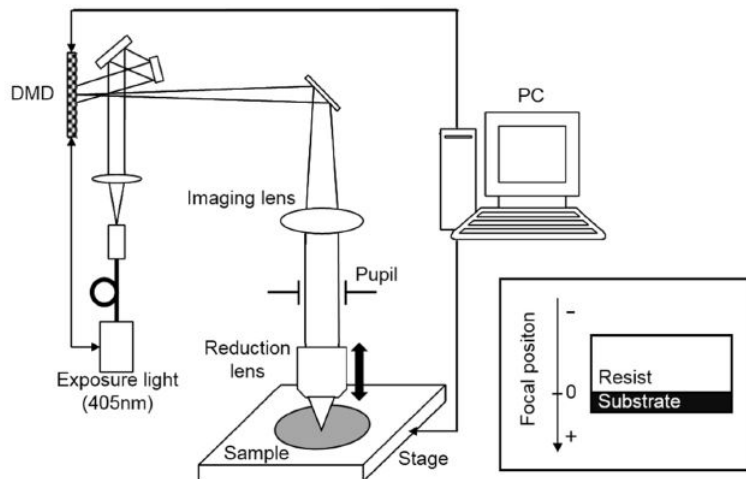


FIGURE 2.1 – Schéma de principe de la lithographie à micro-miroirs [Ma et al., 2015].

L'utilisation des DMD est très avantageuse car elle ne nécessite pas la création d'un masque chaque fois qu'une nouvelle exposition doit être testée. En outre, il est possible d'implémenter une boucle de rétroaction en utilisant un diviseur de faisceau et une photo-diode afin de corriger dynamiquement l'intensité lumineuse réfléchie par la matrice de miroirs par rapport à la cible désirée. La résine principalement utilisée avec cette technique est le Poly(methyl methacrylate) (PMMA). [Ma et al., 2015, Totsu et al., 2006, Deng et al., 2017] présentent des applications de

la lithographie DMD pour la réalisation d'éléments micro-optiques comme des matrices de pyramides, des réflecteurs paraboliques ou encore des microlentilles. Les dimensions de ces structures sont de plusieurs dizaines de micromètres, largement au-delà des dimensions d'intérêt pour cette thèse. [Luo and Zhang, 2017] explorent les possibilités offertes par la double lithographie DMD afin de créer un matricage de microlentilles sur une surface courbe. Cette technique consiste à faire subir deux expositions successives à la résine avec deux doses différentes.

Malgré tous ses avantages la technique de lithographie DMD souffre d'une vitesse d'écriture trop faible pour envisager un transfert industriel. De plus, la taille des champs et des motifs atteignables ne permet pas d'envisager cette approche pour atteindre les dimensions attendues dans le cadre de cette thèse.

2.1.2 Écriture directe par laser

L'écriture directe par laser est une technique relativement récente de micro-fabrication se basant sur l'utilisation d'un laser à dose variable afin de créer des motifs dans une résine photosensible. La source est une diode laser de longueur d'onde d'exposition 405nm ou 375nm dont le taille de spot permet, pour les appareils les plus performants, d'atteindre des performances en résolution jusqu'à 300nm (Modèle DWL 66+ d'Heidelberg Instrument [hei, 2020]). Selon les modèles, le nombre de doses différentes s'élève à 128 ou 256 même s'il est possible, en théorie, d'atteindre un nombre élevé de niveaux en combinant plusieurs expositions à doses différentes au même endroit.

Chaque point de la résine peut être exposée à une dose précise. Après exposition la résine est développée comme en lithographie classique. La relation entre niveau d'intensité et épaisseur de résine après développement (courbe de contraste) peut être obtenue simplement grâce à des expositions tests suivies d'une mesure profilométrique. En utilisant cette relation, [Loomis et al., 2016] propose un algorithme permettant de déterminer la valeur de dose à appliquer en chaque point de la résine de manière à obtenir une forme donnée après développement. Il applique son algorithme à la réalisation d'une matrice de microlentille de plusieurs dizaines de micromètres de diamètre.

[Khazi et al., 2018] utilise également la lithographie directe par laser, et concentre son étude sur le transfert des formes obtenues dans le substrat par gravure Reactive Ion Etching (RIE).

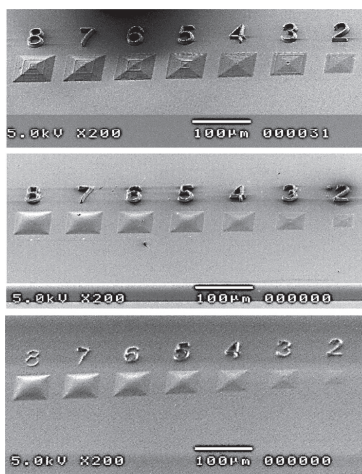


FIGURE 2.2 – Images SEM pour différents types de pyramides après l'étape de développement (haut), de fluage (milieu) et après transfert dans le silicium (bas) [Lima et al., 2019].

[Lima et al., 2019] utilise un dispositif d'écriture directe laser avec 128 niveaux dont la résolution latérale est de 600nm. La longueur d'onde du laser est de 405nm. Le dispositif utilisé est «tout-en-un» : le laser est fourni avec un logiciel permettant de renseigner le profil résine souhaité de manière à générer l'exposition idéale, cette dernière étant ensuite affinée grâce à la courbe de contraste de la résine, déterminée expérimentalement. Des microlentilles, pyramides, et extrusions sont illustrées. Les dimensions latérales de ces objets dépassent plusieurs centaines de nanomètres. L'impact du hardbake et du transfert de la forme par RIE est également étudié dans l'article. La Figure 2.2 à gauche illustre les différentes étapes entre l'exposition et le transfert dans le silicium de motifs pyramides. La résolution atteignable par l'écriture directe la-

ser ne permet pas de l'envisager pour adresser les dimensions d'intérêt dans cette thèse.

2.2 Techniques avec masque

Dans cette section seront présentées les techniques utilisant un masque pour moduler l'intensité lumineuse reçue par la résine.

2.2.1 Lithographie à exposition multiple

Comme son nom l'indique la lithographie à exposition multiple consiste à illuminer la résine plusieurs fois avec différents masques (ou portion de masque) et conditions d'exposition. Cette approche a été développée initialement dans le cadre de la photolithographie classique car elle permet de repousser la limite de résolution de Rayleigh.

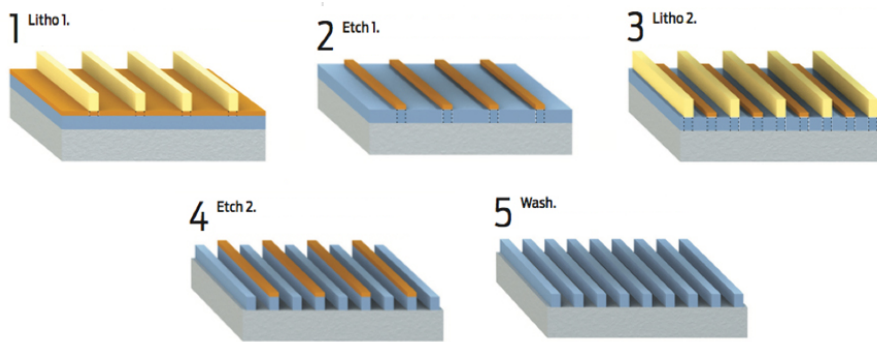


FIGURE 2.3 – Principe de l'exposition multiple, ici double exposition pour la lithographie classique [sei, 2020].

Le nombre d'altitudes atteignables dans la résine avec l'exposition multiple est égal à $n + 1$ où n correspond au nombre d'expositions. En 2017, [Fallica et al., 2017] utilise la double exposition dans un stepper Extrême Ultra-Violet (EUV) avec un masque à interférences. Plusieurs réseaux de diffraction à trois niveaux d'altitude sont obtenus pour un période minimale de 100nm et une hauteur de 80nm. L'utilisation d'une source EUV permet d'atteindre une résolution horizontale d'environ 40nm.

L'exposition multiple n'est pas un candidat sérieux pour réaliser des formes complexes à l'échelle micrométrique à cause du nombre de masques nécessaires devenant très rapidement un facteur limitant. Même en supposant un budget masque non limité, le résultat dans la résine ne serait pas forcément de qualité en raison des problèmes d'alignements entre chaque masque et chaque exposition.

2.2.2 Fluage thermique

Proposé initialement par [Popovic et al., 1988], le fluage thermique est un procédé utilisant les techniques de lithographie conventionnelles pour produire des motifs 3D à géométrie variable. Cette méthode de fabrication ne nécessite qu'un équipement de photolithographie et de traitement thermique, la rendant compatible aux contraintes industrielles de salle blanche.

C'est cette technique qui est aujourd'hui utilisée par STMicroelectronics pour réaliser les matrices de microlentilles abordées dans la partie contexte.

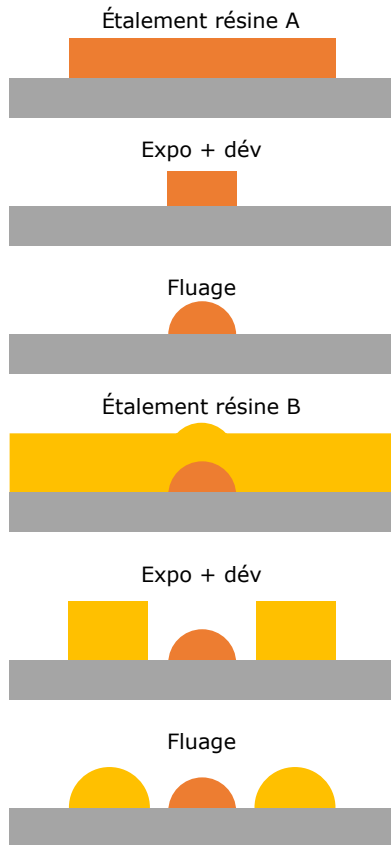


FIGURE 2.4 – Étapes de procédé pour la génération d'une matrice dense de microlentilles à deux tailles.

La technique du fluage consiste à réaliser une photolithographie classique afin de créer des formes dans la résine (cube, cylindre, parallélépipède..) puis à les faire fondre par échauffement thermique. La forme finale est le résultat de phénomènes physiques complexes. Dans le cas où n formes différentes doivent être réalisées sur le même substrat, cette étape doit être répétée n fois. C'est notamment le cas de la double matrice de microlentilles présentée sur la Figure 2.5 ci-dessous dont les étapes de procédé sont résumées graphiquement sur la Figure 2.4 ci-contre.

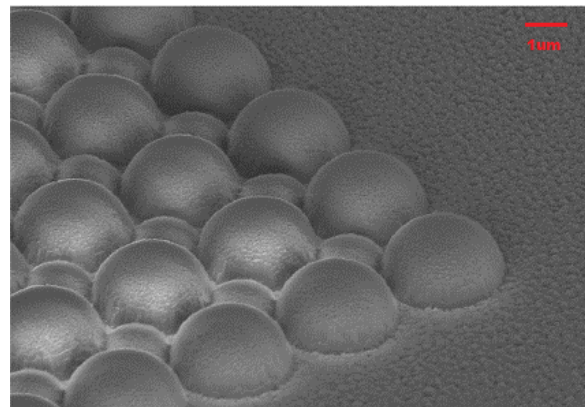


FIGURE 2.5 – Image SEM d'une matrice de microlentilles à deux tailles.

L'optimisation de la forme des microlentilles nécessite un travail empirique et itératif : la forme obtenue après fluage ne correspond pas forcément à celle attendue. De nombreux paramètres influent sur la mise en forme de la résine : les forces d'adhésion, la mouillabilité des interfaces, l'angle de contact entre résine et substrat sur les bords des structures... Il arrive également que la résine réticule durant l'étape de fluage : les chaînes polymères se solidifient entre elles et perdent en mobilité. Enfin, un phénomène de perte de masse est également observé lors de l'étape de mise en forme, dû à une évaporation.

La mise en forme par fluage n'est pas non plus une solution lorsque les formes recherchées mesurent plusieurs centaines de micromètres jusqu'à l'échelle du millimètre. Dans ce cas, le temps de durcissement de la résine est bien trop long pour être industriellement viable. La résine n'est pas durcie uniformément et ces inhomogénéités de durcissement résultent en un gradient d'indice optique néfaste.

Le fluage fait toujours l'objet de recherche active, notamment sur les modèles prédictifs de fluage [Bérard-Bergery et al., 2019]. Cependant, il est clair que la variété des motifs atteignables est intrinsèquement limitée par la nature de la mise en forme par température. Il est par exemple impossible d'obtenir des structures à pente linéaire à l'image d'une pyramide de résine. De plus, des problèmes d'alignement apparaissent dès lors que plusieurs formes doivent être réalisées. Enfin, les étapes de photolithographie successives nuisent à la cadence et au coût de production pour des structures avec différentes altitudes.

2.2.3 Lithographie grayscale avec masque HEBS

Les masques High Energy Beam Sensitive (HEBS) sont constitués d'une plaque de verre crown¹ naturellement transparente à l'illumination. Une implantation ionique est réalisée de manière à rajouter des atomes d'argent juste en dessous de la surface du verre. En exposant cette structure à un faisceau électronique suffisamment énergétique ($>10\text{keV}$) la transmission du matériau peut être modifiée localement grâce à une réaction chimique entre les atomes d'argent et les cristaux du verre. La diminution de la transmission est proportionnelle à la dose appliquée. Un masque HEBS est visible sur la Figure 2.6 ci-dessous :

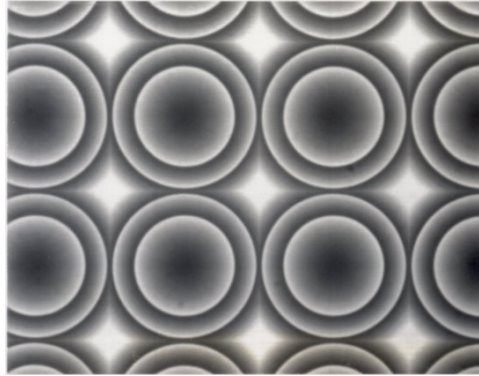


FIGURE 2.6 – Micro-photo de la transmission d'un masque HEBS [Canyon Materials].

La lithographie grayscale avec masque HEBS reste peu développée, avec un seul fabricant de masque sur le marché [can, 2020]. Le fabricant de masque fournit un masque de calibration permettant d'obtenir la courbe de contraste de la résine à partir de 200 niveaux de gris différents. [Yuan et al., 2002] utilise la courbe de contraste obtenue avec le masque de calibration afin de réaliser une microlentille de $50\mu\text{m}$ de diamètre. Le temps d'exposition est très long : plus de 30 minutes. Le masque utilisé n'est pas présenté, mais est décrit comme un arrangement d'anneaux concentriques dont la densité optique diminue du centre de la lentille vers l'extérieur.

[Yang et al., 2007] utilise également un masque de calibration afin de réaliser un masque HEBS permettant d'obtenir des matrices de microlentille asymétriques à base hexagonale. Le masque est constitué d'anneaux d'un micromètre d'épaisseur avec des densités optiques différentes. L'article souligne que la courbe de contraste obtenue pour la résine présente des instabilités pour des grandes valeurs de densités optiques. Afin d'obtenir une surface lisse, les densités optiques utilisées sont donc restreintes entre 0 et 1.

Plus récemment, [Dillon et al., 2008] étudie l'application de la lithographie HEBS pour réaliser un coupleur optique (largeur de $25\mu\text{m}$ et hauteur de $8\mu\text{m}$) et souligne, sur la base de simulations, les limitations inhérentes à l'utilisation de la courbe de contraste comme outil de construction du masque. Il utilise un modèle photolithographique similaire à celui qui sera décrit dans le chapitre 3 et le modèle de développement de la résine de Mack (3.37). Une calibration complète du modèle résine est réalisée : les paramètres de Dill sont déterminés en mesurant la transmission de la résine. Le modèle de développement est calibré *in situ* pendant l'étape de développement pour plusieurs doses différentes. La calibration est finalement ajustée sur la base des courbes de contraste de la résine.

Deux simulations de l'étape de développement sont réalisées : la première seulement selon la direction z (1D), la seconde en prenant en compte la nature isotrope de l'étape de développement (2D). L'approche uni-directionnelle donne les résultats les plus proches du design initial mais

1. Le crown est un type de verre utilisé dans la fabrication des lentilles. Il est notamment apprécié pour sa faible dispersivité.

néglige les effets latéraux de l'étape de développement. L'écart entre le design et le profil réel est d'autant plus important que l'épaisseur de résine augmente et que les densités optiques varient rapidement sur le masque.

Enfin, [Dillon et al., 2008] propose une méthode d'optimisation de masque, dont le point de départ est le masque obtenu avec l'approche courbe de contraste. Le profil résine est simulé puis le masque est ajusté en utilisant un algorithme de *recuit simulé*. La fonction de coût correspond aux moindres carrés entre le profil visé et simulé. L'optimisation est réalisée sur la base de l'optique géométrique et la simulation donne de bons résultats. Cependant, aucun résultat expérimental n'est proposé.

2.2.4 Lithographie grayscale avec masque binaire

La lithographie grayscale est une extension de la lithographie classique appliquée à la réalisation de formes arbitraires dans une résine photosensible. Le masque utilisé en lithographie grayscale est composé exclusivement de motifs de chrome sous-résolus ou en limite de résolution. Ce type de motifs permet une modification locale d'amplitude à l'illumination incidente sur la résine. La résine étant spatialement exposée à une dose variable, son taux de dissolution est modifié localement. Le taux de développement d'une résine (négative ou positive) étant proportionnel à son degré de dissolution dans le développeur, il est possible d'obtenir des formes 3D complexes en contrôlant avec précision la dose reçue par chaque point de la résine. Les structures obtenues peuvent être transférées dans le substrat par gravure ou conservées telles quelles.

La taille, la forme, et la disposition des motifs de chrome sur le masque sont autant de variables qui influent sur sa transmission. Tous ces paramètres sont souvent regroupés sous le terme générique de densité de chrome. La densité de chrome est toujours choisie de manière à éviter le transfert direct des motifs de chrome dans la résine. Afin de respecter cette condition, les motifs de chrome sont dessinés de manière à rester en limite de résolution de l'équipement de photolithographie, donnée par le critère de Rayleigh adapté à la lithographie (1.3).

La nomenclature utilisée pour décrire l'organisation d'un masque grayscale classique est définie sur la Figure 2.7 :

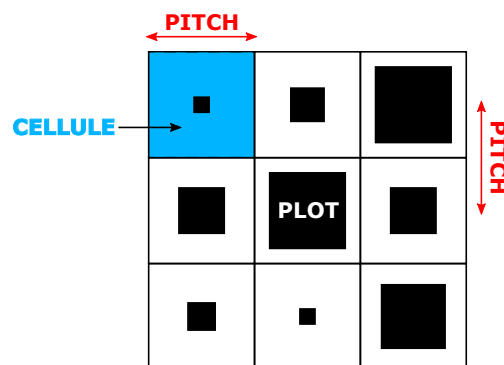


FIGURE 2.7 – Nomenclature associée à un masque grayscale type Pulse Width Modulation (PWM) utilisé dans le cadre de cette thèse.

Les carrés de chrome sont appelés plots. Chaque plot est inscrit dans une cellule élémentaire carrée dont le côté correspond au pitch. Le pitch est également la distance qui sépare le centre de deux plots. Plusieurs stratégies de création de masque sont utilisées. Elles se différencient par la gestion du placement et de la taille des plots de chrome sur le masque :

PWM Le pitch en x et y est maintenu constant. C'est la taille des plots qui est modifiée. Cette méthode nécessite beaucoup de plots mais l'implémentation est aisée. Ce type de modulation est illustré sur la Figure 2.8a.

Pulse Density Modulation (PDM) La taille des plots est maintenue constante. C'est la position des plots qui varie. Cette méthode nécessite moins de plots mais l'implémentation est plus difficile (respect des règles de fabricant de masque). Ce type de modulation est illustré sur la Figure 2.8b.

L'écrasante majorité des publications traitant de la lithographie grayscale repose sur une modulation de la taille des plots.



(a) Masque à modulation de taille des plots.

(b) Masque à modulation de densité des plots.

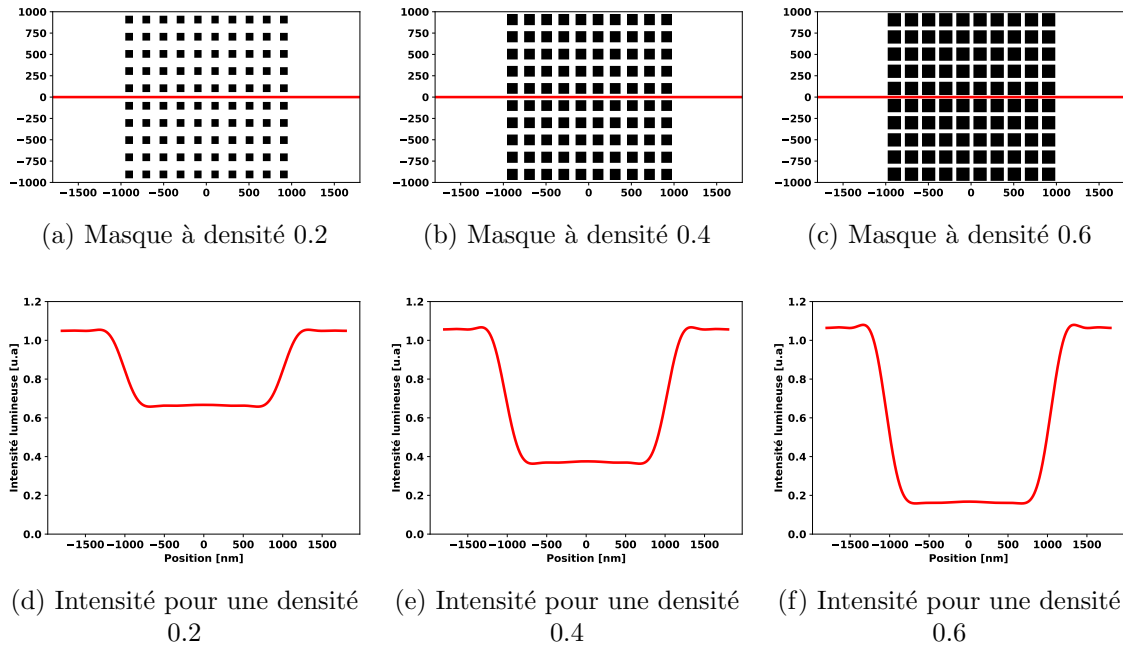
FIGURE 2.8 – Illustration de la différence entre un masque à modulation de taille (2.8a) et de densité (2.8b) de plots.

Dans le cadre d'un masque PWM, la densité de chrome est définie comme le rapport surfacique entre un plot de chrome et la cellule dans lequel il est contenu selon la formule suivante :

$$D = \frac{S_{Cr}}{S_{cellule}} = \frac{S_{Cr}}{pitch^2} \quad (2.1)$$

où S_{Cr} et $S_{cellule}$ correspondant à la surface du plot de chrome et de la cellule.

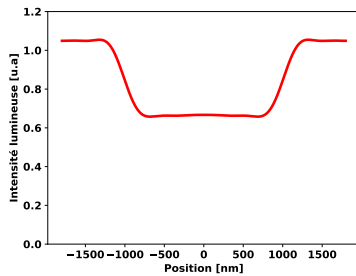
La Figure 2.9 présente l'intensité lumineuse transmise à travers un masque PWM à différentes densités de chrome. Ce type de masque permettra de caractériser la réponse de la résine à des doses variables, et sera présenté en détail dans le chapitre 4.



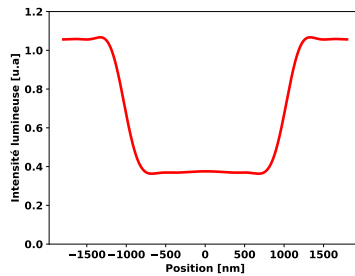
(a) Masque à densité 0.2

(b) Masque à densité 0.4

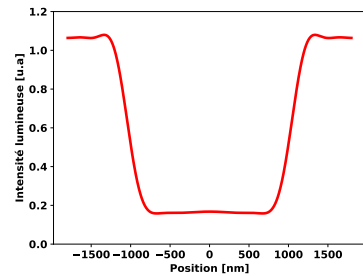
(c) Masque à densité 0.6



(d) Intensité pour une densité 0.2



(e) Intensité pour une densité 0.4



(f) Intensité pour une densité 0.6

FIGURE 2.9 – Intensité transmise pour plusieurs densités de chrome. Le profil d'intensité est évalué le long de la ligne rouge sur les masques au sommet de résine (image aérienne).

On note que l'intensité lumineuse est affectée par la densité de chrome. Lorsque cette dernière est élevée, les plots de chrome sont petits et laissent passer plus de lumière ; le masque présente une transmission forte. En revanche lorsque la densité se rapproche de l'unité une plus grande partie de lumière est bloquée, la transmission est faible.

L'image aérienne résultant de l'illumination du masque va se propager dans la résine et modifier son taux de dissolution. L'image aérienne n'est pas conservée au cours de sa propagation. Elle est affectée par des phénomènes d'absorption et de changement de focus. L'étape de développement va partiellement retirer la résine en fonction du taux d'exposition local. La Figure 2.10 ci-dessous présente le profil résine simulé résultant des masques de la Figure 2.9.

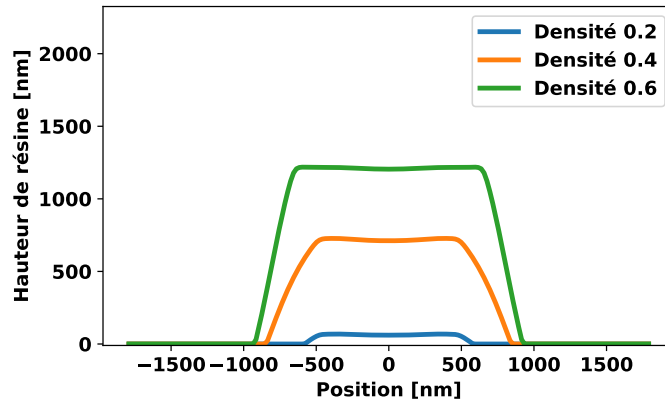


FIGURE 2.10 – Profil de résine après développement pour les 3 densités de chrome de la Figure 2.9 pour une épaisseur de résine initiale de 1550nm.

En utilisant des densités de chrome différentes il est donc possible d'atteindre différentes hauteurs dans la résine à partir d'une seule étape de lithographie. Ce principe est utilisé en lithographie grayscale de manière à obtenir des formes plus complexes que celles présentées sur la Figure 2.10. La Figure 2.11 représente un masque grayscale classique et l'image aérienne correspondante. La simulation de l'image aérienne du masque et de la réponse de la résine seront détaillées dans le chapitre 3.

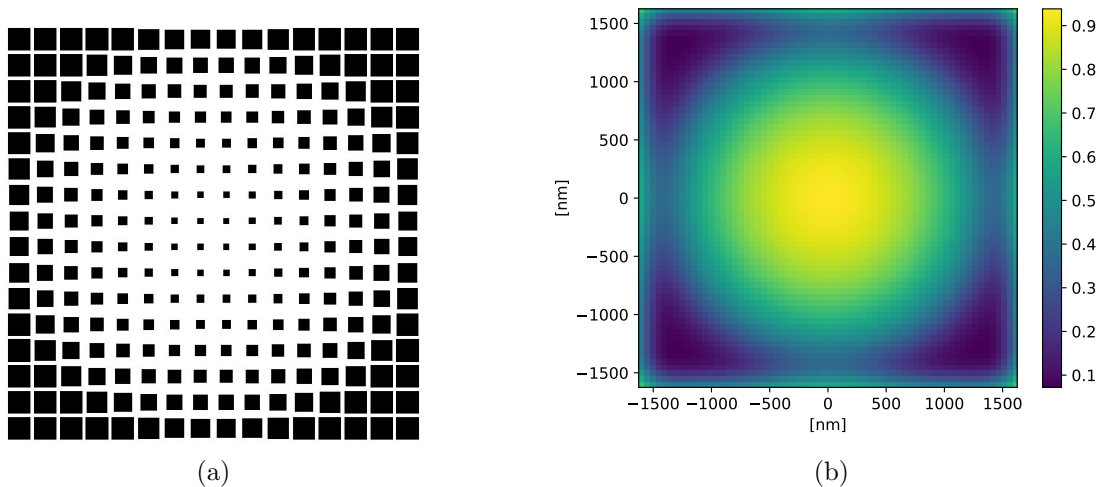


FIGURE 2.11 – Exemple d'un masque grayscale complexe (2.11a) et de son image aérienne (2.11b) associée.

Contrairement à la lithographie conventionnelle, la lithographie grayscale repose sur un développement partiel de la résine. Par conséquent, les caractéristiques recherchées pour une résine à application grayscale sont différentes de celles d'une résine conventionnelle. En lithographie classique, le critère principal dans le choix d'une résine est sa sensibilité à la dose, c'est-à-dire l'inertie avec laquelle la résine va réagir chimiquement sous exposition. Dans le cadre du grayscale, une résine à faible sensibilité est préférable de manière à obtenir des transitions douces entre deux niveaux d'intensité lumineuse reçus. La sensibilité verticale d'une résine à la dose, nous l'avons vu, peut être extraite de sa courbe de contraste. On utilise souvent le contraste de la résine (1.10) pour quantifier la sensibilité de la résine à la dose.

La Figure 2.12 présente 3 courbes de contraste différentes. La courbe en pointillés représente une courbe de contraste idéale en photolithographie classique, le passage entre un développement total et une absence de développement de la résine est instantané. Le contraste d'une telle résine est infini. Un tel comportement permet d'obtenir des flans droits dans la résine. La courbe en pointillés discontinus (contraste faible) correspond à la courbe de contraste idéale pour une application grayscale : chaque couple altitude/dose est unique et le passage entre deux hauteurs différentes n'est pas abrupt. Enfin, la courbe continue (contraste moyen) représente une courbe de contraste proche de la réalité et modélisée ici sous forme de fonction sigmoïde : à ses extrémités plusieurs doses aboutissent à des hauteurs de résine similaires et la zone de transition restreint le nombre de niveaux d'intensité lumineuse exploitables pour réaliser une structure 3D.

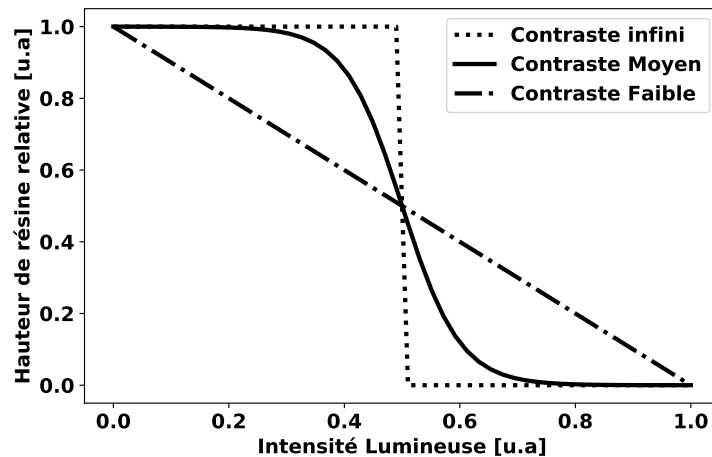


FIGURE 2.12 – Illustration de trois courbes de contraste. La hauteur résultante de résine après développement est donnée en fonction de la dose reçue par la résine.

Le choix de la résine est donc une étape clef pour la réussite d'une lithographie grayscale. Une faible valeur de contraste et un comportement linéaire à la dose sont recherchés de manière à pouvoir disposer de la plus grande gamme de densité de chrome lors de la création du masque. Cependant le contraste de la résine n'est pas toujours le seul critère à considérer. En premier lieu, rappelons que la courbe de contraste ne renseigne que sur la sensibilité verticale et non pas horizontale de la résine. Or nous verrons que cette dernière ne peut pas être négligée à partir d'une certaine taille de structure. De plus, certaines applications nécessitent que la résine présente certaines propriétés optiques (transparence à certaines longueurs d'onde, opacité,...) ou thermiques (résistance à des étapes de traitement en température, au fluage, à des conditions de fonctionnement embarquées,...). Une fois qu'une résine candidate est retenue se pose la question de la création du masque.

Le principal défi de la lithographie grayscale réside dans la création du masque permettant d'obtenir une certaine forme pour une résine et des conditions de procédé donnés. Cette tâche est d'autant plus complexe que les dimensions visées sont petites et que les films de résine sont

fins. De nombreux articles décrivent des méthodes de création de masque, se basant toutes sur l'utilisation de la courbe de contraste de la résine comme fonction de transfert entre le profil résine et la densité de chrome requise sur le masque. Cette approche fonctionne lorsque les structures sont suffisamment grandes pour que la densité de chrome varie lentement à l'échelle du masque. Une séquence de création de masque classique suit les étapes suivantes :

1. Exposition d'une résine en utilisant un masque de calibration avec différentes densités de chrome connues.
2. Mesure des profils résines obtenus pour les différentes densités de chrome au profilomètre ou à l'AFM.
3. (Optionnel) Détermination théorique ou expérimentale de la transmittance des différentes zones de chrome du masque. Cette dernière est souvent approximée.
4. Création de la courbe de contraste reliant les altitudes des profils de résine mesurés à la transmittance de la densité de chrome correspondante (ou directement à la densité).
5. La cible résine est divisée en cellules qui correspondront aux cellules sur le masque (Figure 2.7)
6. Pour chaque cellule du profil résine cible, une hauteur représentative est calculée et convertie en densité de chrome. Le plot de chrome associé à cette densité est placé sur la cellule du masque correspondante.

Les premiers travaux traitant du grayscale ne calculaient pas la transmittance du masque directement (étape 3). [Oppliger et al., 1994] décrit la fabrication d'un masque à 8 niveaux de gris différents réalisés en PWM. Une courbe de contraste expérimentale est établie à partir de ces 8 densités. Deux structures sont réalisées : un réseau de diffraction en dents de scie et une lentille de Fresnel à 8 niveaux. Le masque est conçu exclusivement avec les 8 densités de chrome utilisées pour calculer la courbe de contraste de la résine. Aucune extrapolation n'est faite pour utiliser une densité de chrome intermédiaire. Il aura donc fallu deux masques : un pour établir la courbe de contraste et l'autre pour la création des formes en prenant en compte cette dernière.

La même année, [Purdy, 1994] utilise 50 densités de chrome pour tracer une courbe de contraste expérimentale dans le but d'obtenir des microlentilles (aucune dimension n'est fournie), toujours en PWM.

Plus tard, la transmittance d'un masque grayscale a été extrapolée en se basant sur l'image aérienne résultante de l'exposition d'un masque composé d'un réseau de lignes/espaces avec une source cohérente ($\sigma = 0$). En supposant que seul l'ordre zéro est capté par la lentille de projection, l'intensité lumineuse moyenne au plan image pour un réseau de ligne/espace est donnée par la formule suivante :

$$I = \left(1 - \frac{l}{p}\right)^2 \quad (2.2)$$

où l représente la largeur des lignes de chrome et p la période du réseau. L'intensité lumineuse est donc liée au rapport surfacique entre le chrome et le quartz sur le masque. L'obtention de cette formule est démontrable analytiquement, se référer par exemple à [Mack, 2008]. En appliquant cette formule au cas de la Figure 1.17 (page 26) on obtient :

$$I = \left(1 - \frac{365}{730}\right)^2 = (1 - 0.5)^2 = 0.25 \quad (2.3)$$

Cette intensité est bien celle obtenue avec le modèle optique sur la Figure 1.17a où l'intensité constante est égale à 0.25. Lorsque la source est circulaire et de cohérence σ , la fréquence spatiale maximale, ν_{max} , traversant la lentille de projection est :

$$\nu_{max} = (1 + \sigma) \frac{NA}{\lambda} \quad (2.4)$$

Par conséquent, la période maximale, p_{max} , à respecter pour que les ordres supérieurs de diffraction ne soient pas captés est :

$$p_{max} = \frac{1}{1 + \sigma} \frac{\lambda}{NA} \quad (2.5)$$

La formule (2.2) est extrapolée dans le cas du grayscale à PWM, en premier par [Wagner et al., 1995, Quenzer et al., 1995]. Le rapport largeur de ligne sur pitch est «transposé» au cas de carré de chrome par le rapport entre la surface de chrome et celle de la cellule, ce qui correspond à la densité définie en (2.1).

$$I = \left(1 - \frac{S_{Cr}}{\text{pitch}^2}\right)^2 = (1 - D)^2 \quad (2.6)$$

Le raisonnement est donc partiellement erroné : d'un côté on suppose que la source est cohérente pour établir (2.2) et de l'autre on utilise une source partiellement cohérente pour établir une condition sur le pitch maximal (2.5). En pratique la source utilisée sera partiellement cohérente. Ces approximations restent néanmoins suffisantes pour des variations de taille de chrome lentes à l'échelle du masque. La fabrication d'une microlentille de 16 μm de diamètre est illustrée mais les images de mauvaise qualité ne permettent pas de juger du résultat.

[Yao et al., 2000] est le premier à observer que les formules (2.2) et (2.6) ne sont pas suffisantes lorsque le masque est construit avec des plots de chrome. Il propose un algorithme de correction de la taille et de la position des plots de manière à obtenir l'image aérienne désirée. Pour de faibles écarts, la position des plots est ajustée. Lorsque les écarts sont importants c'est la taille des plots qui est modifiée. L'algorithme n'optimise donc pas le profil résine mais seulement l'image aérienne, les détails de la fonction de correction ne sont pas donnés. Une matrice de 5 microlentilles par 5 (diamètre de 38 μm) est obtenue. Malheureusement, l'article ne permet pas de conclure sur la qualité des structures obtenues. Cet article est néanmoins important puisque c'est le premier à faire mention de l'utilisation d'un outil de simulation lithographique rigoureux pour le calcul de l'image aérienne, et d'un processus d'optimisation (non décrit).

[LeCompte et al., 2001] utilise 8 niveaux de gris différents, dont la densité optique est choisie de manière à ce que la différence d'altitude dans la résine entre deux niveaux de gris soit toujours la même, ce procédé est appelé «linéarisation de la réponse». Ces 8 niveaux de gris sont utilisés pour la génération d'optiques diffractantes à base de réseaux de diffraction.

[Waits et al., 2002] propose une étude afin de déterminer la plus petite taille de plot et le plus grand pitch utilisables pour les masques de type PDM. Les résultats mettent en évidence que tous les niveaux de gris présents sur un masque ne sont pas forcément résolus dans la résine. Le nombre de niveaux de gris «utiles» dépend du pitch, de l'incrément minimal entre deux tailles de plots, mais également de la dose et des conditions de développement de la résine. Lorsque le pitch est trop important des oscillations se forment dans la résine, dont la période correspond à celle du pitch. Ces oscillations se retrouvent lors du transfert éventuel de la forme par RIE.

[Morgan et al., 2004] s'inspire de la formule (2.6) pour la fabrication d'une lentille de Fresnel de diamètre 1.6mm. La courbe de contraste de la résine est approximée par une fonction gaussienne afin d'accélérer le calcul du masque puisque ce dernier est constitué de millions de plots. L'article propose une formule permettant de déterminer la surface de chrome idéale pour un pitch donné et une hauteur de résine souhaitée. La lentille de Fresnel est ensuite transférée dans le substrat de silicium par RIE. Le résultat est visible sur la Figure 2.13 :

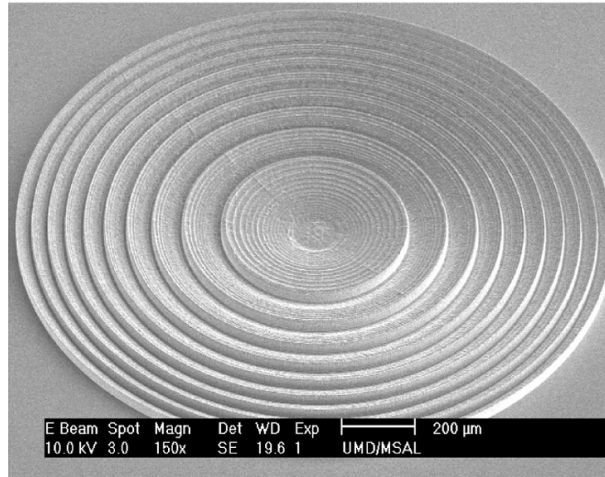


FIGURE 2.13 – Image SEM de la lentille de Fresnel obtenue après transfert RIE dans du silicium [Morgan et al., 2004].

[Waits et al., 2005] poursuit le travail de [Morgan et al., 2004] en investiguant des structures plus grandes et des profondeurs de gravure plus importantes. Un micro-compresseur de plusieurs millimètres est obtenu, l'article s'attache particulièrement à décrire le processus de gravure.

[Nock and Blaikie, 2008] utilisent l'approche PWM afin d'adresser des motifs pour des applications en micro-fluidique. Le masque est fabriqué par une méthode hybride : par photolithographie classique dans les zones résolues et par lithographie e-beam dans les zones sous-résolues. La courbe de contraste est établie à partir de 10 densités de chrome. La cible résine ne comportant que peu d'altitudes différentes et des dimensions de plusieurs centaines de micromètres, ces 10 densités suffisent à obtenir, selon l'auteur, des résultats satisfaisants.

[Mosher et al., 2009] étudie la double exposition grayscale afin d'augmenter les niveaux de gris utilisables en PWM. Pour n niveaux de gris en exposition simple la double exposition permet théoriquement d'atteindre n^2 niveaux. Le principe de la double exposition est illustré sur la Figure 2.14 à gauche. La commutativité des expositions est étudiée et une méthode de préparation de masque est décrite. Cependant, les résultats souffrent de problèmes d'alignement du masque entre deux expositions successives qui induit des inhomogénéités de développement. De plus l'intensité lumineuse est calculée à partir de la formule (2.2) ce qui n'est pas rigoureux puisque la source utilisée n'est pas cohérente et que le masque est constitué de plots de chrome et non pas de lignes/espaces. La Figure 2.14 décrit l'impact de deux mésalignements sur la forme de la résine attendue.

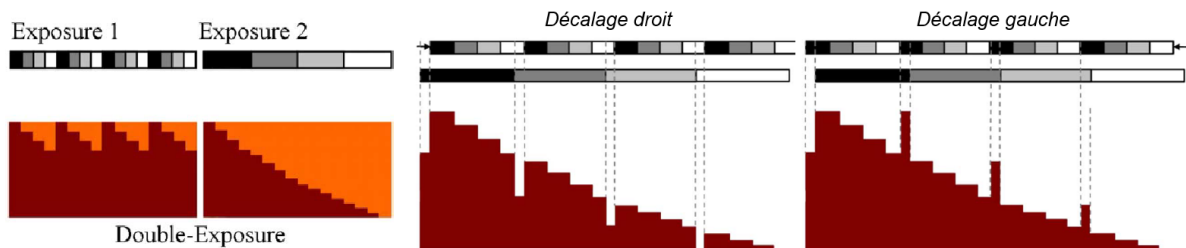


FIGURE 2.14 – Principe de la double exposition grayscale afin d'obtenir une structure en escalier dans la résine. Impact d'un mésalignement du masque à droite et à gauche sur la structure obtenue.

[Audran et al., 2010] utilise la technique de *halftoning* pour réaliser des matrices de micro-lentilles. La taille de la cellule est ici fixée à la valeur du (minCD). A chaque élément de la grille est associé un état «on» ou «off». Dans l'état «on» le carré rempli de chrome alors qu'en état «off» le carré correspond à une zone de quartz. La Figure 2.15 présente une image d'un tel masque.

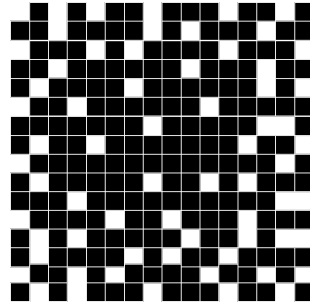


FIGURE 2.15 – Masque grayscale en halftoning. Les pixels en noirs sont en état «on».

Dans un premier temps la cible résine est convertie en niveaux de gris à l'aide de la courbe de contraste de la résine. Les niveaux de gris sont ensuite transposés sur la grille du masque à l'aide d'un algorithme d'*halftoning* (trois algorithmes sont étudiés). En traitement d'image cette technique vise à approximer une image en nuance de gris par une image en noir et blanc. L'idée est ici transposée au cas d'un masque. Les résultats expérimentaux montrent que la cible résine n'est pas parfaitement atteinte mais l'article souligne la capacité du grayscale à réaliser des structures à plusieurs hauteurs dans la résine sur la base d'une seule exposition pour les échelles d'intérêt dans cette thèse. Le problème principal du *halftoning* repose sur la capacité ou non du fabricant de masque à réaliser les zones où deux plots de chrome sont en contact au niveau d'un de leur sommet. De plus les éléments de chrome restent fixés sur une grille et n'ont pas de liberté de mouvement.

Beaucoup plus récemment, [Smith et al., 2019] utilise à nouveau la formule (2.2) pour créer un masque grayscale à base d'anneaux concentriques et pour la réalisation de réseaux de diffraction à base de ligne/espace. Le profil résine est simulé à l'aide du logiciel PROLITH afin de prévoir le résultat dans la résine et de construire le masque itérativement. Le pitch utilisé est proche du micron, les formes obtenues dans la résine et présentées dans l'article mesurent plusieurs dizaines de micromètres. Une partie de ces formes sont illustrées sur la Figure 2.16 ci-dessous :

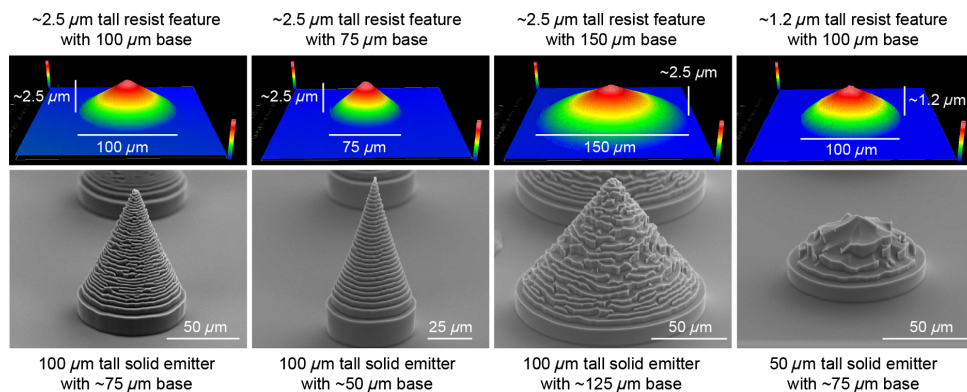


FIGURE 2.16 – Illustrations (profilomètre et SEM) de microstructures obtenues en lithographie grayscale après gravure [Smith et al., 2019].

Les techniques de création présentées plus haut sont valides lorsque les variations de profil de résine s'effectuent lentement et pour des films fins de résine. En effet, toutes les approches reposent sur deux hypothèses fortes. Tout d'abord les phénomènes de diffraction au niveau du masque sont quasiment systématiquement négligés. La seconde hypothèse consiste à considérer uniquement le procédé lithographique dans sa verticalité : les courbes de contraste sont établies sur de larges zones de résine où la densité de chrome est constante sur plusieurs micromètres. La hauteur de résine est évaluée expérimentalement au centre de ces zones. Par conséquent, les courbes de contraste ne prennent pas en compte l'horizontalité de l'étape de développement comme nous l'avons déjà expliqué au chapitre 1. Ces deux hypothèses bien qu'incorrectes physiquement suffisent lorsque les motifs recherchés mesurent plusieurs dizaines voire centaines de micromètres. En revanche, elles sont limitées pour des tailles plus faibles [Audran et al., 2010].

Conclusion du chapitre

Le Tableau 2.1 ci-dessous regroupe les différentes techniques de microfabrication abordées au cours de ce chapitre en fonction de leur forces (+) et faiblesses (-) dans plusieurs catégories.

TABLE 2.1 – Forces et faiblesses des différentes techniques de microlithographie disponibles.

Masque	Technique	Coût	Résolution	Variété formes	Rendement
Non	DMD	+	-	+++	-
	Laser	+	-	+++	-
Oui	Litho + fluage	-	++	-	++
	HEBS	+	++	++	-
	Exposition multiple	-	++	-	+
	Grayscale	+	++	+++	+++

Dans cette thèse on se propose d'utiliser la lithographie grayscale à masque binaire appliquée à la réalisation de structures dont les dimensions horizontales et verticales sont inférieures à $2\mu\text{m}$. De manière plus globale, l'objectif de la thèse est de développer une méthodologie de préparation de masque grayscale permettant d'obtenir une structure 3D arbitraire pour une résine et des conditions de procédé données.

Pour STMicroelectronics, les structures d'intérêts sont des matrices de microlentilles. Ces structures sont actuellement réalisées par une succession de deux étapes de lithographie suivies d'un fluage. Le passage au grayscale pourrait permettre de dépasser les limitations du fluage en réalisant les deux microlentilles à hauteurs différentes en une seule étape de lithographie. La solution de création de masque pourra également être mise à profit afin de répondre à d'autres problématiques qui nécessitent la création de structures en relief dans la résine.

En quoi la thèse part d'un état connu :

- Le grayscale existe en tant que méthode de microfabrication depuis une trentaine d'années.
- Des premiers essais ont été réalisés à STMicroelectronics et publiés [Audran et al., 2010]

En quoi la thèse explore l'inconnu :

- Les dimensions visées n'ont jamais été aussi petites en lithographie grayscale.
- La thèse développe une méthode itérative d'optimisation de masque basée sur des modèles optique et résine rigoureux.
- L'optimisation simultanée de la position et de la taille des plots de chrome n'a jamais été réalisée.

Chapitre 3

Modèle photolithographique

Résumé du chapitre

Cette section décrit le modèle lithographique développé dans le cadre de cette thèse. Le but de ce modèle est de retourner un profil résine en 3 dimensions en fonction d'une illumination, d'un masque, des paramètres de la résine exposée et du développeur utilisé. Le modèle complet s'articule autour de 2 sous-modèles utilisés séquentiellement : un modèle optique et un modèle résine (composé d'un modèle d'exposition et d'un modèle de développement). Un schéma en bloc du modèle complet est illustré sur la Figure 3.1 ci-dessous :

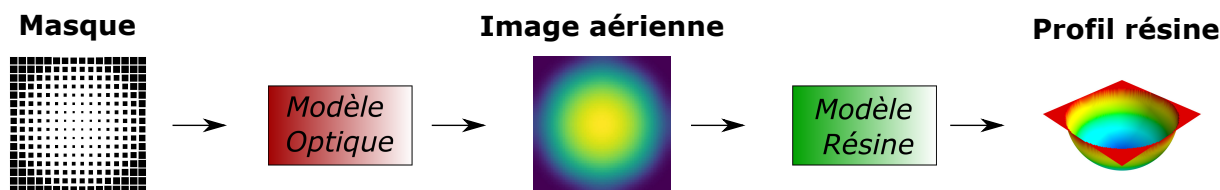


FIGURE 3.1 – Illustration du modèle lithographique par bloc.

L'objectif du modèle optique est de calculer l'image aérienne d'un masque en fonction des conditions d'illumination utilisées et des éléments de chrome présents sur le masque. Le modèle résine débute par la modélisation de l'exposition. Ce modèle simule les modifications chimiques subies par la résine au cours de la propagation de l'image aérienne dans le volume de résine pendant la durée de l'exposition. Le profil final de résine est calculé à l'issue de la simulation de l'étape de développement. Le modèle optique et résine font l'objet de ce chapitre et seront présentés en détail à tour de rôle.

Une attention particulière sera donnée aux hypothèses utilisées ainsi qu'à la précision et aux temps de calcul. En effet, ces modèles ont pour vocation d'être utilisés lors de processus d'optimisation des masques grayscale. Au cours de ces optimisations plusieurs centaines d'appels au modèle photolithographique seront nécessaires. L'équilibre entre précision et temps de calcul est donc un aspect primordial et sera argumenté.

3.1 Modèle optique

Le modèle optique calcule l'interaction entre le système d'illumination et le masque aboutissant à la formation de l'image aérienne au sommet de la résine. Le dispositif de lithographie 300mm utilisé dans le cadre de cette thèse est un stepper Canon iZ+. Les caractéristiques de cet équipement nécessaires à la simulation de l'image aérienne sont regroupées dans le Tableau 3.1 ci-dessous :

TABLE 3.1 – Paramètres optiques du stepper utilisé pendant la thèse.

Type source	λ	σ	NA	Polarisation	Grandissement
Circulaire	365nm	0.7	0.57	Aucune	0.25

Les modèles optiques des systèmes de lithographie ont fait l'objet d'un intérêt croissant depuis le début des années 1950. Les articles «fondateurs» rédigés jusque dans les années 1990 offrent un cadre théorique rigoureux permettant le calcul de l'image aérienne au prix d'une compréhension mathématique parfois ardue des concepts utilisés [Theimer et al., 1952, Hopkins, 1953, Dill, 1975, Kintner, 1978, Saleh and Rabbani, 1982, Yeung, 1988, Cole et al., 1992, Flagello, 1993, Cobb, 1995].

Les modèles n'ont eu de cesse de s'améliorer afin de suivre l'évolution des systèmes de lithographie. Ils ont bénéficié en parallèle de l'évolution des capacités de calcul des machines, permettant des simulations toujours plus rapides et la prise en compte d'effets de procédé toujours plus pointus (polarisation de la lumière, influence de l'angle d'incidence,...). Plusieurs solutions commerciales proposent des simulateurs basés sur ces modèles et sont largement utilisés par la communauté lithographique : Sentaurus [Sentaurus, 2020], DoctorLitho [Fühner et al., 2007], PROLITH [Mack, 2005]....

Dans le cadre de cette thèse un travail bibliographique important a été mis en place afin de développer un modèle optique pertinent et indépendant de toute solution commerciale. L'intérêt est double. Tout d'abord ce travail a permis une meilleure compréhension des phénomènes optiques mis en jeu, ces connaissances étant essentielles pour la lithographie grayscale. Ensuite, le développement du modèle en langage Python a permis son intégration rapide et aisée dans l'environnement de développement du laboratoire et de l'entreprise.

En premier lieu, les hypothèses utilisées pour la modélisation de la lithographie optique seront présentées. Les effets des différents éléments du système optique seront définis mathématiquement afin d'aboutir à l'équation de l'image aérienne dans le cadre de la configuration de Köhler. Enfin, deux méthodes de calcul permettant de résoudre numériquement cette équation seront présentées : la méthode d'Abbe et l'approche d'Hopkins. Dans le cadre de cette thèse, une méthode rapide et précise du calcul de l'image aérienne est désirée. Ce travail de comparaison a pour objectif de déterminer la méthode offrant le meilleur compromis entre précision et temps de calcul.

3.1.1 Hypothèses du modèle

Les phénomènes optiques mis en jeu dans le cadre de la lithographie par projection peuvent être décrits dans le cadre de la théorie scalaire de la diffraction [Born et al., 1999] et de l'optique de Fourier [Goodman, 2005]. Dans cette section on se propose de décrire les hypothèses du modèle optique sous forme de questions/réponses.

Qu'est-ce-que l'optique de Fourier ?

Quelles sont les hypothèses utilisées, leurs implications et leurs limites ?

L'optique de Fourier est l'étude de l'optique classique se basant sur les transformées de Fourier. Cette approche est notamment utilisée lorsque le front d'onde observé peut être décrit comme une superposition d'ondes planes. L'optique de Fourier suppose la linéarité du système optique étudié, ce qui est notre cas. En effet, nous verrons que le calcul de l'image aérienne peut, grâce aux propriétés de la source, se résumer à une sommation de la contribution de chaque point source à l'image totale.

Afin de démontrer certaines propriétés en optique de Fourier, les lentilles seront considérées comme fines. De plus, la propagation des rayons sera admise dans le régime paraxial : c'est-à-dire proche de l'axe optique. En optique de Fourier, ces deux hypothèses permettent notamment de démontrer les propriétés de transformée de Fourier d'une lentille¹.

Parmi les propriétés remarquables de l'optique de Fourier, la plus importante est la possibilité de ramener à distance finie la figure de diffraction de Fraunhofer d'un objet illuminé par une onde plane. L'objet doit alors être positionné au niveau du point focal objet d'une lentille convergente. Cette propriété est mise à profit afin de ramener la figure de diffraction du masque au niveau de la pupille d'entrée de la lentille de projection par l'intermédiaire de la lentille de collection.

En plus d'être linéaire le système optique sera supposé invariant par translation. Cette propriété permet de simplifier la position de la figure de diffraction du masque en fonction de la direction d'illumination du masque par un point source. Une illumination par un point source situé hors-axe se traduit par une translation du spectre du masque relativement à la direction d'illumination sans changement d'amplitude des ordres de diffraction du spectre. Ce principe est illustré sur la Figure 3.2 ci-dessous :

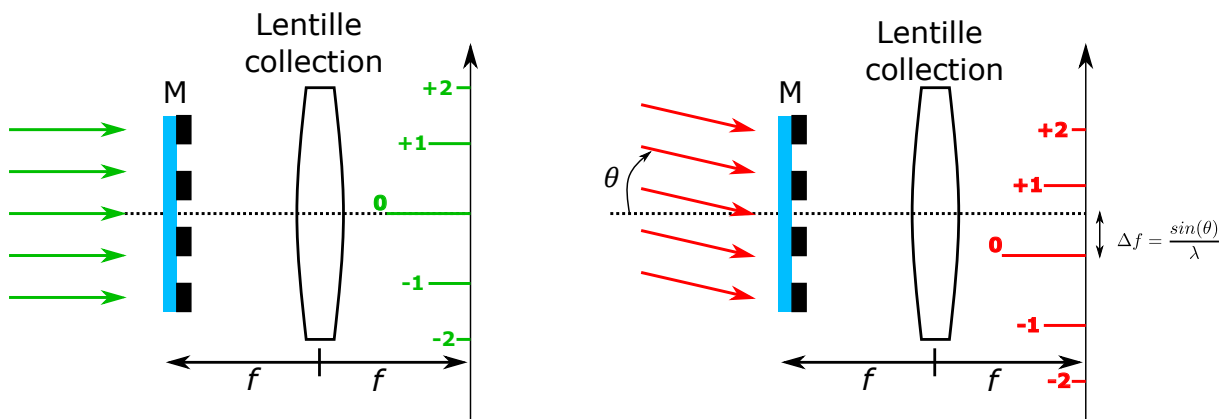


FIGURE 3.2 – Principe d'invariance par translation en régime paraxial. Sous incidence directe (flèches vertes), le spectre du masque est centré sur l'axe optique. Lorsque le masque est illuminé par une onde plane se propageant avec un angle θ relativement à l'axe optique (flèches rouges), le spectre du masque est translaté d'une quantité Δf

1. L'optique de Fourier peut également être utilisée en régime non paraxial.

En notant θ l'angle de propagation de l'onde plane relativement à l'axe optique, le décalage fréquentiel Δf est noté :

$$\Delta f = \frac{\sin(\theta)}{\lambda} \quad (3.1)$$

En optique, ce principe d'invariance est valide pour les zones du champ dites isoplanatiques. Les systèmes optiques sont rarement isoplanatiques sur la totalité du champ, en revanche il est possible de diviser le champ en plusieurs régions où cette condition est valide. Dans le cadre de l'approximation paraxiale on supposera que la totalité du champ est isoplanatique. Cette hypothèse a pour effet de négliger les effets de polarisation car ces derniers tout comme l'incidence d'illumination influencent l'amplitude et la position de la figure de diffraction du masque [Saied et al., 2007].

Le lecteur intéressé pourra trouver la totalité des hypothèses ainsi que les démonstrations aux affirmations présentées dans l'ouvrage de référence : [Goodman, 2005].

Dans quel cadre peut-on utiliser la théorie scalaire de la diffraction ?

Dans le cas où le milieu est diélectrique, homogène, isotrope, non dispersif et linéaire toutes les composantes du champ électrique et magnétique se comportent identiquement et leur comportement est complètement décrit par une unique équation scalaire [Born et al., 1999]. L'utilisation de la théorie scalaire de la diffraction est acceptable dès lors que cette condition est respectée et que les objets diffractants sont de taille égale ou supérieure à la longueur d'onde d'exposition, ce qui est vérifié en lithographie classique.

« When light interacts with objects whose physical dimensions are large compared with its wavelength, we can neglect the field vectors under many circumstances, and approximate Maxwell's equations by laws formulated in the language of geometry. » [Wong, 2005]

La théorie scalaire est utilisée lors du calcul du spectre du masque. L'approche scalaire permet de considérer le masque comme un milieu perturbateur en 2D (l'épaisseur de chrome et de quartz est négligée) afin de calculer la figure de diffraction par simple transformée de Fourier. Il y a donc deux limitations induites par l'hypothèse de diffraction scalaire :

- Le masque n'est pas un milieu purement diélectrique : le chrome est conducteur. De plus l'épaisseur du chrome et du quartz n'est pas nulle. Par conséquent, le couplage entre les composants du champ électrique et magnétique est négligé lors de l'exposition du masque et du trajet de la lumière à travers ce dernier. Pour prendre cet effet en compte, il est nécessaire de passer à la théorie vectorielle de la diffraction. Le spectre du masque est alors calculé en faisant appel à des solveurs numériques rigoureux.
- Il arrive que les éléments sur le masque notamment dans le cas du grayscale soient plus petits ou de tailles proches de la longueur d'onde d'illumination. C'est une limitation connue et admise. Les éléments de chrome sur le masque avoisinant la longueur d'onde de 365nm sont en limite de validité du domaine (ces éléments mesurent donc environ 90nm à l'échelle 1X).

Peut-on négliger la nature vectorielle de la lumière (sa polarisation) ?

Pour la lentille de projection, la polarisation de la lumière peut avoir un impact. C'est notamment le cas pour des valeurs importantes d'ouverture numérique. Lorsque l'ouverture numérique de la lentille de projection augmente, les rayons lumineux voyagent dans des cônes très larges, et interfèrent au plan image. Plus la valeur de NA augmente plus ces interférences sont dépendantes de la direction du champ vectoriel des ondes lumineuses². Il est admis que pour des valeurs de NA inférieure à 0.5 donc des angles inférieurs à 7,5° la théorie scalaire est suffisante

2. Je n'ai pas trouvé d'explications physique à proprement parler, Jérôme as-tu plus d'informations à ce sujet ?

[Flagello and Smith, 2012] : c'est l'hypothèse de paraxialité déjà discutée plus haut. Nous verrons que cette dernière peut être étendue à des ouvertures numériques de 0.6 ($9,215^\circ$) en introduisant un terme correctif [Cole, 1992].

Concernant le masque, les effets de polarisation deviennent important lorsque les motifs diffractants atteignent des dimensions inférieures ou de l'ordre de la longueur d'onde d'illumination. Le seul moyen de prendre en compte ces effets est d'utiliser une simulation électromagnétique rigoureuse pour calculer le champ lointain du masque.

Concernant la source utilisée, n'étant pas polarisée, aucune perte de précision ne sera induite par l'utilisation de la théorie scalaire.

3.1.2 Définition de la source

En lithographie les sources utilisées ne sont pas ponctuelles mais étendues. Le masque est illuminé par des rayons lumineux incidents à différentes angularités. Les points sources donnant naissance à ces rayons lumineux sont spatialement incohérents entre eux, de manière à ce qu'aucune interférence ne se produise et n'aboutisse à des non-uniformités d'illumination sur le masque.

En imagerie partiellement cohérente, il est extrêmement important de bien définir la source car la forme et la taille de cette dernière influencent considérablement le résultat de l'imagerie. Dans le cadre de la configuration de Köhler on sait que la source est imagée au même plan que celui où se trouve le spectre du masque (en absence de masque). On utilise donc la source effective exprimée dans l'espace fréquentiel au niveau de ce plan (f, g) . Chaque point source dans l'espace réel de la source a son équivalent fréquentiel au niveau du plan de la pupille. Cette fréquence dépend bien évidemment de la position du point source et de la longueur d'onde utilisée [Goodman, 2005, Wong, 2005].

« *The effective source is the image of the illumination source in the pupil. It can be perceived as the composite spectrum arising from all illumination light rays in the absence of mask.* » [Wong, 2001].

En résumé, un point de la source dans l'espace réel génère un spectre d'ondes planes incident sur le masque. En l'absence de masque, ce spectre d'ondes planes est recombinaison par la lentille de collection au plan pupille de la lentille de projection en un point qui est l'image du point source.

La Figure 3.3 ci-contre illustre 3 ondes planes incidentes sur le masque 3.3a et la correspondance en terme de points dans la source effective 3.3b exprimé le plan f, g de la pupille.

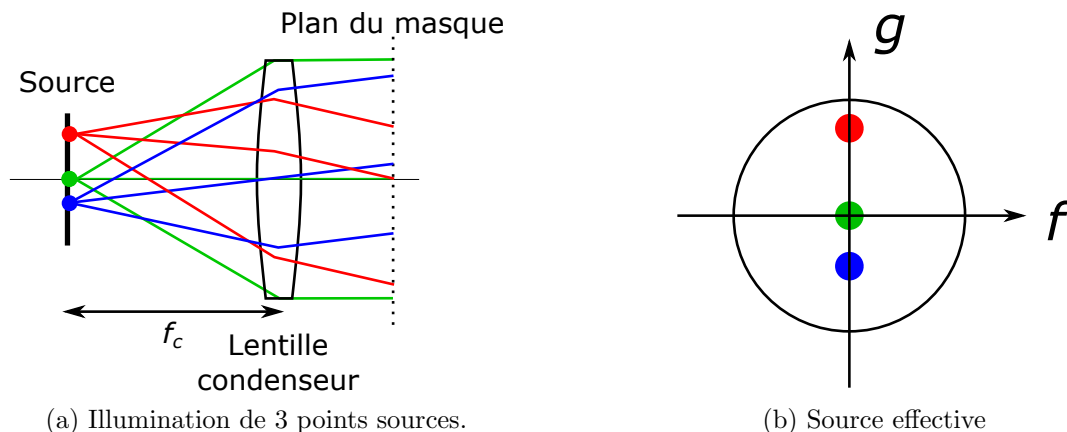


FIGURE 3.3 – 3 ondes planes incidentes à différentes angularités sur le masque 3.3a et correspondances en termes de points sources au niveau de la pupille d'entrée de la lentille de projection 3.3b.

Dans le cas où la source est circulaire et de cohérence σ , la source effective est définie comme suit :

$$\tilde{J}(f, g) = \text{circ} \left(\frac{\sqrt{f^2 + g^2}}{\frac{\sigma \text{NA}}{\lambda}} \right) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sqrt{f^2 + g^2} \leq \frac{\sigma \text{NA}}{\lambda} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.2)$$

Chaque point source visible sur la source effective correspond à une onde plane se propageant à un angle différent par rapport à l'axe optique. Le point central en $(f, g) = (0, 0)$ correspond à une onde plane dont les rayons se propagent parallèlement à l'axe optique (l'illumination serait parfaitement cohérente si seul ce point participait à l'illumination). La notation tilde est utilisée de manière à préciser que la fonction est exprimée dans le domaine fréquentiel. Pour un point source (f, g) l'angle d'incidence de l'onde plane correspondante sur le masque peut être obtenu à partir de la formule (1.7) (page 23).

3.1.3 Définition du masque et de son spectre

Dans le cadre de l'optique de Fourier, l'énergie transmise par le masque forme une distribution au plan de la pupille d'entrée de la lentille de projection proportionnelle au spectre du masque (sa transformée de Fourier) [Goodman, 2005]. Les basses fréquences se retrouvent au centre de la pupille alors que les hautes fréquences se situent en périphérie de cette dernière. La lentille va recombinaison une partie des ordres de diffraction pour former une image du masque sur le plan image (la résine). On peut donc associer à chaque rayon lumineux se déplaçant entre le masque et la pupille d'entrée une paire de fréquence (f, g) correspondant à la composante fréquentielle qu'il représente.

Le traitement du masque en tant que milieu perturbateur peut être traité sous la forme d'un problème 2D ou 3D selon le degré de précision requis et le temps de calcul acceptable.

Masque 2D : Le masque est assimilé à un objet 2D dont la transmission varie abruptement au passage d'une zone de chrome à une zone de quartz. La figure de diffraction est obtenue par simple transformée de Fourier. On parle aussi d'approximation de *Kirchhoff* ou de *masque fin*.

Masque 3D : La géométrie exacte du masque est fournie à un solveur électromagnétique rigoureux type Finite Difference Time Domain (FDTD) ou Rigorous Coupled Wave Analysis (RCWA) qui calcule le champ électromagnétique résultant de la diffraction entre les motifs du masque et l'illumination. Les effets de diffraction 3D et des plasmons de surface sont pris en compte.

L'approche 3D, plus rigoureuse, nécessite néanmoins un temps de calcul beaucoup plus élevé que l'approche 2D. Dès lors que la dimension des plots de chrome est supérieure à la longueur d'onde d'exposition, l'approche 2D est suffisante pour le calcul de l'image aérienne [Born et al., 1999]. Le masque peut alors être décrit mathématiquement en deux dimensions comme un objet binaire à transmission variable $O(x, y)$:

$$O(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x, y) \text{ se situe dans une zone de quartz} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.3)$$

Afin d'être traité numériquement le masque doit être exprimé sur un support discret. Ce support est défini en fonction de la taille du masque et de celle du pixel unitaire (*pixel size* en anglais). Le masque est exprimé sous forme d'une matrice de dimension n_x par n_y .

$$O(n_x, n_y) = \begin{cases} 1 & \text{si } (n_x, n_y) \text{ se situe dans une zone de quartz} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.4)$$

Dans le cadre de cette thèse les masques sont tous carrés par conséquent le nombre et la taille des pixels sont identiques en x et y . Le calcul de la transformée de Fourier peut alors se réaliser

numériquement à l'aide d'une librairie déjà implémentée. Cependant, lorsque les éléments de chrome sont très petits et/ou très proches les uns des autres cette approche nécessite l'utilisation de résolutions très fines en simulation ce qui entraîne un temps de calcul élevé. Pour le nœud technologie 45nm la taille du pixel unitaire est d'environ 1nm [Alpert et al., 2008].

Lorsque le masque n'est constitué que de motifs dits «Manhattan» en d'autres termes de rectangles de chrome, il est possible de calculer la transformée de Fourier analytique du masque. Cette dernière correspond au complémentaire de la somme des transformées de Fourier unitaires de chaque rectangle de chrome dont la formule analytique est connue³. Pour rappel, la transformée de Fourier $\mathcal{F}[\text{rect}(l, w)]$ d'un rectangle de chrome de longueur l et de largeur w , centré en $(0, 0)$ s'écrit :

$$TF[\text{rect}(l, w)](f, g) = lwsinc(fl)sinc(gw) \quad (3.5)$$

où $\text{sinc}(x) = \frac{\sin x}{x}$ correspond à la fonction sinus cardinal. À présent, on ne considère non plus un seul rectangle mais p rectangles différents qui définissent la fonction objet du masque. Chaque rectangle est centré en (x_p, y_p) pour une longueur l_p et une largeur w_p . La transformée de Fourier totale s'exprime grâce aux propriétés d'additivité et de translation de cette dernière :

$$\tilde{O}(f, g) = TF[O(x, y)] = S_x S_y \delta(f) \delta(g) - \sum_p l_p w_p \text{sinc}(f l_p) \text{sinc}(g w_p) e^{-j2\pi(f x_p + g y_p)} \quad (3.6)$$

où δ correspond à la fonction de Dirac, S_x et S_y la dimension du masque en x et y .

Conditions aux limites

Concernant les conditions aux limites, l'utilisation de la transformée de Fourier implique la périodisation du masque à l'infini en x et y . C'est donc la taille de la fenêtre de simulation qui va imposer la période de répétition du masque/motif. Dans le cas où un motif isolé doit être traité, il sera nécessaire d'ajouter artificiellement du quartz tout autour du motif afin de rendre la périodicité équivalente à un motif isolé (on parle de *zero padding*). Dans le cadre de cette thèse, les motifs isolés sont traités en doublant la taille de fenêtre du motif.

3.1.4 Définition du système de projection

Le système de projection a pour rôle de capter les rayons lumineux issus de la diffraction du masque et de les recombinaer avant de les projeter sur le substrat. La lentille de projection agit comme un filtre passe-bas pour les rayons lumineux issus du masque. Le cône d'acceptance de la lentille de projection est défini par son ouverture numérique NA. Les rayons lumineux se propageant hors de ce cône ne sont pas captés et ne participent pas à la formation de l'image.

Ce filtrage signifie que le système de projection peut-être modélisé comme un filtre passe bas dont la fréquence de coupure est donnée par $\frac{NA}{\lambda}$. Dans le cas où le système de lentilles de projection est idéal il est néanmoins dit limité par la diffraction. La fonction de transfert du système de projection (aussi appelée fonction pupille) est notée $\tilde{H}(f, g)$, elle s'écrit :

$$\tilde{H}(f, g) = \text{circ} \left(\frac{\sqrt{f^2 + g^2}}{\frac{NA}{\lambda}} \right) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sqrt{f^2 + g^2} \leq \frac{NA}{\lambda} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.7)$$

Le champ au niveau de la pupille de sortie de la lentille de projection correspond donc au produit entre le champ au niveau de la pupille d'entrée (le spectre du masque) et la fonction pupille (3.7). Il est possible de prendre en compte des effets supplémentaires comme par exemple les aberrations du système de projection en modifiant la fonction pupille. Nous verrons dans les pages suivantes la prise en compte du facteur d'obliquité et de defocus.

3. Cette approche est généralisable à toute forme dont la transformée de Fourier analytique est connue.

Facteur d'obliquité

Dans les équations précédentes, la réduction du système optique n'a pas été prise en compte, elle a été supposée égale à 1 (la réduction est $M = 4$. Elle correspond à l'inverse du grandissement $\bar{M} = 0.25$ pour le stepper Canon iZ+). De plus, la validité de l'hypothèse paraxiale atteint ses limites lorsque l'ouverture numérique NA s'approche de 0.5. À partir de ce seuil, il est normalement nécessaire de passer à la théorie vectorielle de la diffraction [Yeung, 1988].

Cependant, il est possible de conserver une approche scalaire en incluant un terme correctif au niveau de la pupille de projection permettant d'étendre l'hypothèse de paraxialité tout en prenant en compte les effets de réduction. Ce terme correctif est appelé facteur d'obliquité et noté K. Cette extension du modèle scalaire a été proposée initialement par [Cole et al., 1992] reprise par [Gallatin, 2001] et discutée dans le cadre de la théorie vectorielle de la diffraction par [Rosenbluth et al., 2008]. Le facteur d'obliquité est exprimé dans le plan de la pupille de projection comme suit :

$$K(f, g) = \left[\frac{1 - \lambda^2 \bar{M}^2 (f^2 + g^2)}{1 - \lambda^2 (f^2 + g^2)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.8)$$

Le facteur d'obliquité modifie l'amplitude des ordres de diffraction passant à travers la pupille d'entrée du système de projection. Plus les ordres de diffraction sont élevés, plus la correction est importante. Ce facteur est une extension de l'hypothèse paraxiale : il prend en compte les erreurs faites sur les ordres élevés de diffraction. Ces derniers correspondent à des rayons se propageant hors du cadre paraxial. La valeur maximale du facteur d'obliquité, K_{max} , est obtenue pour les fréquences captées en bord de pupille lorsque $f^2 + g^2 = \frac{NA^2}{\lambda^2}$:

$$K_{max} = \left[\frac{1 - \bar{M}^2 NA^2}{1 - NA^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.9)$$

Le facteur d'obliquité vient multiplier la fonction pupille (3.7) qui devient :

$$\tilde{H}(f, g) = K(f, g) \text{circ} \left(\frac{\sqrt{f^2 + g^2}}{\frac{NA}{\lambda}} \right) = \begin{cases} K(f, g) & \text{si } \sqrt{f^2 + g^2} \leq \frac{NA}{\lambda} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.10)$$

La Figure 3.4 représente la valeur maximale du facteur d'obliquité en fonction du NA pour un facteur de réduction égal à $M = 4$.

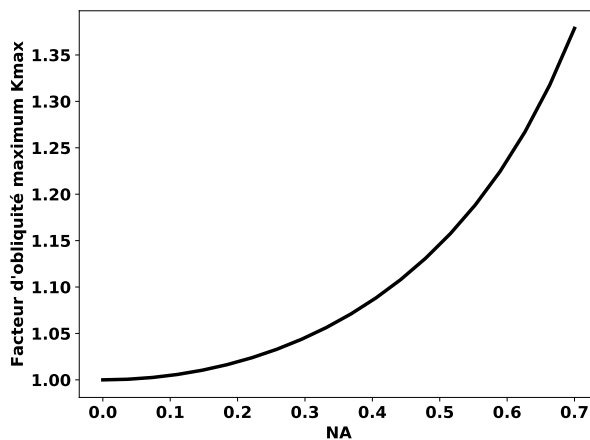


FIGURE 3.4 – Évolution de la valeur maximale du facteur d'obliquité K_{max} en fonction de l'ouverture numérique de la lentille de projection NA avec $\bar{M} = 0.25$.

Dans notre cas, pour une ouverture numérique de 0.57, le changement d'amplitude des ordres de diffraction en bord de pupille atteint 9.75%.

La Figure 3.5 ci-dessous présente l'impact du facteur d'obliquité pour trois images aériennes. La première Figure 3.5a correspond à un masque vide sans motifs de chrome. La Figure 3.5b à un masque composé d'un plot de chrome carré de côté 90nm centré en zéro. Sur la Figure 3.5c ce plot mesure 350nm de côté.

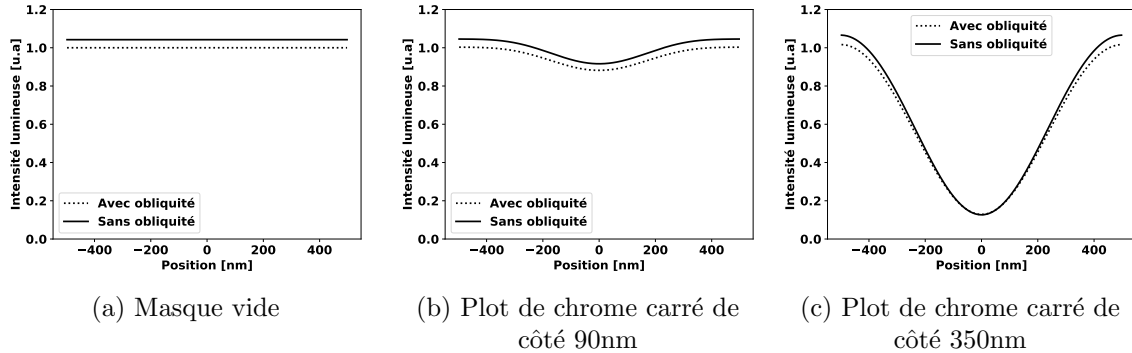


FIGURE 3.5 – Comparaison de trois images aériennes pour différents masques illustrant l'impact du facteur d'obliquité. Les paramètres optiques utilisés sont les suivants : $NA=0.57$, $\sigma = 0.7$, $\lambda = 365nm$.

On remarque que la différence d'intensité pour un masque vide est constante. Cette différence se retrouve en bord de domaine pour les deux autres masques, là où il n'y a pas de chrome. Plus le plot de chrome est petit, plus le poids des ordres élevés est grand. Par conséquent, la correction d'obliquité est plus importante puisque cette dernière impacte les hautes fréquences dans la pupille de projection.

Lorsque l'ouverture numérique de la lentille de projection augmente, la lumière voyage dans des cônes très larges, et interfère au plan image. Plus la valeur de NA augmente, plus ces interférences sont dépendantes de la direction du champ vectoriel des ondes lumineuses. Avec l'introduction de la lithographie par immersion ($NA=1.35$) la prise en compte de ces effets est devenue cruciale et a fait l'objet de nombreuses publications [Theimer et al., 1952, Kim, 2007, Adam and Maurer, 2004, Bailey and Adam, 2005].

Aberrations du système de projection

Jusqu'à présent nous nous sommes placés dans le cadre d'un système optique limité par la diffraction en négligeant les aberrations. Il existe cependant des déformations du front d'onde même dans le cadre de l'approximation paraxiale. Ces déformations affectent la phase de l'onde traversant le système optique.

Les aberrations du système de projection sont prises en compte par une modification de la fonction de transfert du système de projection. Sans aberration, une onde sphérique arrivant sur la pupille d'entrée de la lentille de projection ressort également sous forme d'onde sphérique. Une fonction d'aberration notée $W(f, g)$ est utilisée pour exprimer les déviations de phases du front d'onde.

Un terme en exponentiel complexe est rajouté à la fonction pupille (3.10) de manière à prendre en compte les aberrations :

$$\tilde{H}(f, g) = \begin{cases} K(f, g)e^{ikW(f, g)} & \text{si } \sqrt{f^2 + g^2} \leq \frac{NA}{\lambda} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.11)$$

Une des possibilités pour renseigner la fonction W est d'utiliser les polynômes de Zernike [Born et al., 1999]. Ces polynômes rendent compte des différents types d'aberrations possibles

pour le front d'onde. Il existe une infinité de polynômes différents exprimés dans le plan de la pupille d'entrée de la lentille de projection. Certains d'entre eux sont visibles sur la Figure 3.6 ci-dessous :

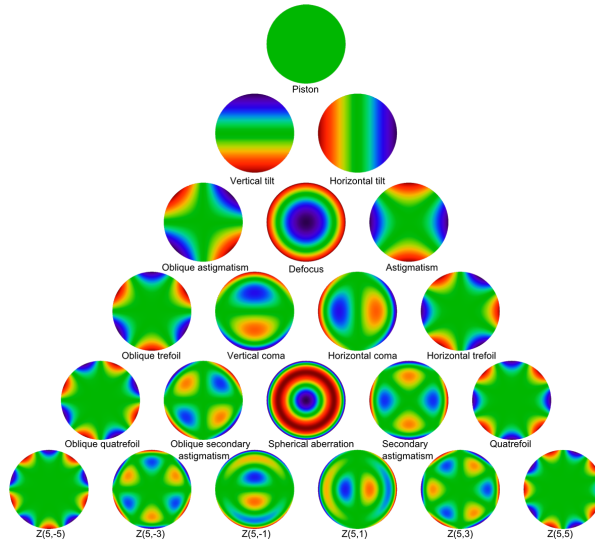


FIGURE 3.6 – Visualisation des 21 premiers polynômes de Zernike exprimés dans le plan de la pupille d'entrée du système de projection. Chaque polynôme correspond une aberration optique.

L'aberration que nous allons développer ici est celle de defocus. En optique cette aberration signifie qu'une image n'est pas en focus. La position du plan image (focus nul) du système de projection est translaté le long de l'axe optique d'une distance D . Le defocus réduit le contraste et le piqué de l'image. En lithographie le defocus correspond à la distance entre le plan image idéal de la lentille de projection et la position de la surface du substrat.

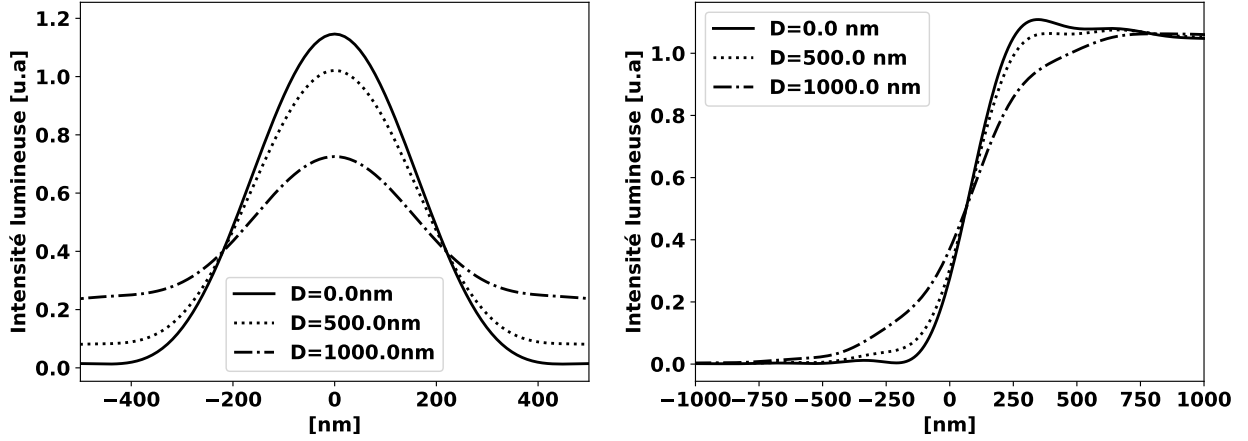
Distinction entre focus et defocus

Le **focus** correspond à un réglage machine de la position du substrat le long de l'axe optique. La convention utilisée par notre équipement situe le **focus** nul ($D = 0$) au sommet de la résine. En changeant la valeur de **focus** sur l'équipement un **defocus** est créé. Le substrat est déplacé pour focaliser l'image aérienne au dessus de la résine (**defocus** négatif $D < 0$) ou dans l'épaisseur de résine (**defocus** négatif $D > 0$). Le **focus** correspond donc à un réglage machine (la cause), le **defocus** correspond à l'écart entre le **focus** nul et le **focus** appliqué (la conséquence).

La fonction d'aberration associée au defocus est donnée par l'équation suivante [Mack, 1997] :

$$W(f, g) = D\sqrt{1 - (f^2 + g^2)\lambda^2} \quad (3.12)$$

L'aberration de defocus exprimée dans le plan de la pupille est visible sur la Figure 3.6. Les fréquences élevées sont plus affectées que les basses par l'aberration à l'image du facteur d'obliquité. L'impact du defocus sur l'image aérienne est illustré dans le cas d'un réseau ligne espace de période 500nm sur la Figure 3.7a et d'un masque Heavyside sur la Figure 3.7b ci-dessous. Dans ce cas précis, une augmentation du defocus entraîne une perte de contraste pour l'image aérienne.



(a) Masque : lignes de 500nm et période de 1000nm (b) Masque : fonction Heavyside centrée en zéro.

 FIGURE 3.7 – Vue en coupe de l'impact du defocus sur l'image aérienne pour deux masques différents ($NA=0.57$, $\sigma = 0.7$, $\lambda = 365nm$).

L'aberration de defocus est paire : un defocus positif ou négatif aboutit à la même image aérienne (c'est le cas de toutes les aberrations de Zernike centro-symétriques). Les courbes de la Figure 3.7 tracées pour les mêmes valeurs de defocus négatives auraient été identiques.

3.1.5 Calcul de l'image aérienne

Dans le cadre de la théorie scalaire de la diffraction et de l'optique de Fourier, l'intensité lumineuse au plan image $I(x, y)$ est donnée par la formule suivante (3.13) (le lecteur intéressé peut se référer aux ouvrages suivants afin d'obtenir plus de détails : [Wong, 2005, Gross et al., 2005]). À nouveau, les fonctions exprimées dans l'espace fréquentiel sont surmontées d'un tilde « $\tilde{\sim}$ », afin de ne pas les confondre avec celles exprimées dans l'espace direct.

$$I(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{J}(f, g) \tilde{H}(f + f', g + g') \tilde{H}^*(f + f'', g + g'') \tilde{O}(f', g') \tilde{O}^*(f'', g'') e^{-2i\pi[(f' - f'')x + (g' - g'')y]} df dg df' dg' df'' dg'' \quad (3.13)$$

où l'on a noté $\tilde{J}(f, g)$ la source effective, $\tilde{H}(f, g)$ la fonction de transfert du système de projection et $\tilde{O}(f, g)$ le spectre du masque. L'intégrale est sextuple. Soit un nombre complexe $z = a + ib$, son complexe conjugué est noté $z^* = a - ib$.

Il n'existe pas dans le cas général de solution analytique à l'équation (3.13). Nous présenterons deux formulations permettant une résolution numérique : le modèle d'Abbe et l'approche d'Hopkins. La différence fondamentale entre la méthode d'Abbe et d'Hopkins repose sur l'ordre d'intégration de l'équation (3.13). Il est important de noter que les deux méthodes donnent exactement les mêmes résultats.

En réalité, il est faux de parler de deux méthodes distinctes. Abbe est historiquement le premier à théoriser la formation d'une image dans le cadre de la configuration de Köhler appliquée à la microscopie [Abbe, 1873]. Hopkins proposera, un peu moins d'un siècle plus tard, un changement d'ordre d'intégration astucieux pour résoudre l'équation (3.13) [Hopkins, 1953].

Modèle d'Abbe

La formulation d'Abbe (également appelée méthode d'intégration de la source) est obtenue en changeant les ordres d'intégration de l'équation (3.13) de manière à décomposer le système optique partiellement cohérent en une superposition de systèmes optiques cohérents [Ma and Arce, 2011].

$$I(x, y) = \iint_{\sqrt{f^2+g^2} \leq \frac{\sigma_{NA}}{\lambda}} \tilde{J}(f, g) \left[\left| \iint_{-\infty}^{+\infty} \tilde{H}(f+f', g+g') \tilde{O}(f', g') e^{-2i\pi[f'x+g'y]} df' dg' \right|^2 \right] df dg \quad (3.14)$$

Le terme entre crochets correspond à l'image cohérente due à un point source $\tilde{J}(f', g')$ situé en (f', g') . L'image aérienne totale est obtenue en intégrant la contribution de tous les points sources. Il s'agit d'une sommation incohérente sur les intensités lumineuses de chaque point source.

Implémentation numérique

1. Calcul du spectre du masque $\tilde{O}(f, g)$ par méthode numérique ou analytique si le masque le permet. Le support en fréquences (f, g) est également calculé, il dépend du nombre de pixels n_x et de la taille de pixel choisis lors de la discrétisation du masque.
2. Calcul de la source effective discrétisée sur le support en fréquence (f, g) , la source peut être vue comme une liste de paires de fréquences respectant la condition de filtrage de l'équation (3.2).
3. Boucle sur tous les points sources. Pour chaque paire de fréquence (f, g) on calcule l'image aérienne cohérente associée : calcul de la fonction pupille déplacée (hypothèse d'invariance par translation), $\tilde{H}(f+f', g+g')$ puis multiplication avec le spectre $\tilde{O}(f', g')$. Enfin, calcul numérique de la transformée de Fourier inverse de ce produit, dont la valeur absolue est élevée au carré.
4. Sommation de toutes les images cohérentes obtenues pour chaque point source et pondération par le nombre de points sources.

L'effort de calcul dépend majoritairement de la taille des matrices en jeu (nombre de points de maillage). Plus le nombre de points sources est important, plus le nombre de calculs d'images aériennes cohérentes est grand, avec à chaque fois un effort de calcul important sur la transformée de Fourier inverse numérique.

Modèle d'Hopkins

Hopkins [Hopkins, 1953] propose une autre formulation de l'équation (3.13) dans le but de séparer la contribution de la source de celle du masque dans la formation de l'image aérienne. La compréhension physique de l'équation est cependant plus ardue que celle d'Abbe. Hopkins introduit la notion de coefficient de transmission croisé pour réécrire l'équation (3.13) de la manière suivante :

$$I(x, y) = \iiint_{-\infty}^{+\infty} \text{TCC}(f', g'; f'', g'') \tilde{O}(f', g') \tilde{O}^*(f'', g'') e^{-2i\pi[(f'-f'')x+(g'-g'')y]} df' dg' df'' dg'' \quad (3.15)$$

Le terme $\text{TCC}(f', g'; f'', g'')$ correspond au coefficient de transmission croisé : Transmission Cross-Coefficient (TCC). Les TCC permettent de caractériser le système optique comme un système à 4 dimensions. L'expression du $\text{TCC}(f', g'; f'', g'')$ est la suivante :

$$\text{TCC}(f', g'; f'', g'') = \iint_{-\infty}^{+\infty} \tilde{J}(f, g) \tilde{H}(f+f', g+g') \tilde{H}^*(f+f'', g+g'') df dg \quad (3.16)$$

Le calcul des TCC est souvent présenté graphiquement. Le produit entre les 3 fonctions est représenté dans le plan (f, g) . La source effective $\tilde{J}(f, g)$ ne bouge pas durant l'intégration, ce sont les deux fonctions pupilles $\tilde{H}(f + f', g + g')$ et $\tilde{H}^*(f + f'', g + g'')$ qui se déplacent.

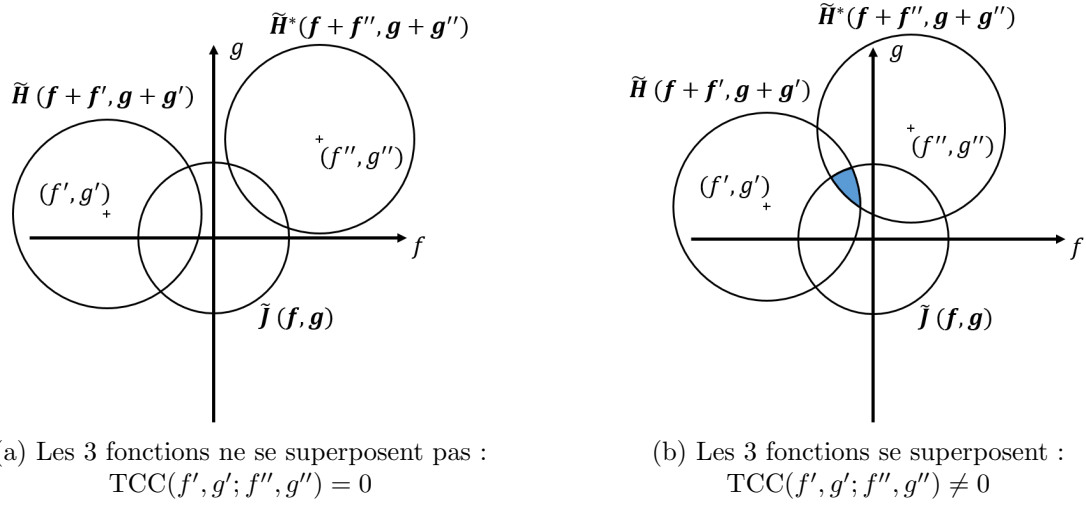


FIGURE 3.8 – Visualisation graphique du calcul des TCC. Lorsque les 3 fonctions ne se superposent pas, l'intégrale est nulle par conséquent le TCC aussi (3.8a). Lorsque les 3 fonctions se superposent (3.8b), l'intégrale devient non nulle (zone bleue).

Le calcul des TCC consiste donc à explorer l'ensemble des positions des deux pupilles qui permet de créer un chevauchement avec la source effective. Lorsque une telle configuration est trouvée, on a donc une position pour la première pupille centrée en (f', g') couplée avec une position pour la seconde pupille centrée en (f'', g'') qui retourne un TCC non nul. Ce coefficient TCC est ensuite multiplié avec le point du spectre du masque situé en (f', g') et du conjugué du point du spectre du masque situé en (f'', g'') . Le terme en exponentiel complexe permet de rebasculer dans l'espace réel.

Il suffit de calculer une seule fois les TCC pour une condition d'exposition donnée. En l'absence d'aberrations, le calcul des TCC peut être réalisé analytiquement [Kintner, 1978]. Cependant, dès que des aberrations interviennent, l'intégrale à calculer devient complexe et doit être évaluée numériquement.

L'image est formée par la somme des interférences des paires de fréquences (f', g') et (f'', g'') correspondant au spectre du masque $\tilde{O}(f, g)$. L'interaction entre ces paires de fréquence est pondérée par le coefficient TCC correspondant.

Implémentation numérique

1. Calcul du spectre du masque $\tilde{O}(f, g)$ par méthode numérique ou analytique si le masque le permet. Le support en fréquences (f, g) est également calculé, il dépend du nombre de pixels n_x et de la taille de pixel choisis lors de la discrétisation du masque.
2. Calcul des coefficients $TCC(f', g'; f'', g'')$ sur le support en fréquence (f, g) . Notons que la valeur des TCC peut être complexe lorsque des aberrations sont prises en compte car les fonctions pupilles sont complexes !
3. Sommation des contributions pour les valeurs de TCC non nulles.

L'étape numéro 2 est la plus conséquente. Dans le cas où les matrices considérées sont de tailles (n_x, n_y) , il est nécessaire d'évaluer $n_x^2 n_y^2$ combinaisons de TCC. Ce qui demande rapidement un effort numérique conséquent. Il est possible de réduire cet effort en se concentrant sur les combinaisons où les deux fonctions pupilles sont relativement centrées par rapport à la

fonction de source effective. De plus, il est évident que par la symétrie des fonctions utilisées un nombre important de simplifications peuvent être réalisées pour accélérer le calcul des TCCs [Toh, 1988, Cobb, 1995].

Comme nous l'avons déjà expliqué précédemment, les TCC rendent compte d'une condition d'illumination donnée et dans le cas où les plots de chrome sur le masque changent il n'est pas nécessaire de les recalculer (tant que la discrétisation des matrices reste inchangée).

3.1.6 Comparaison modèle Abbe et Hopkins

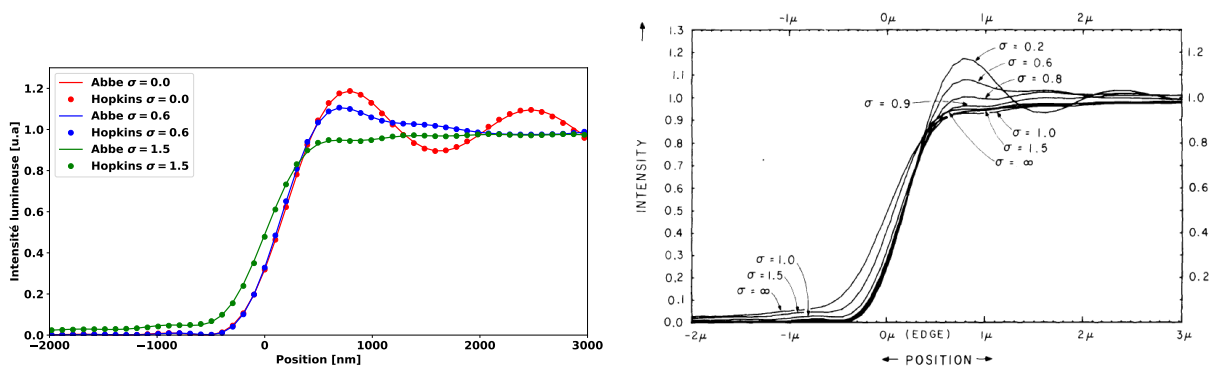
Dans cette section on se propose d'étudier les différences entre les modèles d'Abbe et d'Hopkins sur des cas classiques de littérature. Les algorithmes seront comparés en 1D et en 2D. Les temps de calcul présentés ne prennent pas en compte le temps de calcul des TCC pour le modèle d'Hopkins. Ils sont calculés une seule fois. Les caractéristiques de la machine utilisée pour réaliser les simulations sont disponible en annexe 7.3.

Heavyside

Le premier masque de comparaison est un masque Heavyside dont la réponse optique a été étudiée dans l'article [O'Toole and Neureuther, 1979] et illustrée sur la Figure 1.8a (page 18) : le masque est composé de chrome pour les valeurs de x négatives et de quartz pour les valeurs positives. Les paramètres de la simulation sont regroupés dans le tableau suivant :

	$[x_{min}, x_{max}]$	$[y_{min}, y_{max}]$	n_x	n_y
1D	[-5000nm, 5000nm]	-	101	-
2D	[-5000nm, 5000nm]	[-500nm, 500nm]	101	25

La longueur d'onde d'illumination est de 436nm et l'ouverture numérique NA égale à 0.28. La Figure 3.9 présente le résultat du calcul de l'image aérienne pour les deux modèles à différentes valeurs du facteur de cohérence de la source σ . Le temps de calcul pour chaque méthode sera évalué sous la forme d'une moyenne sur 100 itérations.



(a) Courbes simulées avec le modèle d'Abbe et d'Hopkins.

(b) Figure originale de l'article [O'Toole and Neureuther, 1979].

FIGURE 3.9 – Comparaison entre les images aériennes simulées par la méthode d'Abbe et d'Hopkins pour un masque type Heavyside à différentes valeurs de cohérence de la source (3.9a). Les courbes sont comparées à un article de la littérature (3.9b).

Le nombre de points sources N_S , de coefficients TCC N_{TCC} , et le temps de calcul par itération pour le cas 1D et 2D sont regroupés dans le Tableau 3.2 ci-dessous :

TABLE 3.2 – Résultats de simulation du modèle Abbe et Hopkins pour un masque Heavyside en 1D et 2D en fonction de la valeur de cohérence de la source.

σ	N_S^{1D}	N_{TCC}^{1D}	$t_{Abbe}^{1D} [s]$	$t_{Hopkins}^{1D} [s]$	N_S^{2D}	N_{TCC}^{2D}	$t_{Abbe}^{2D} [s]$	$t_{Hopkins}^{2D} [s]$
0	1	169	0.001	0.003	1	4225	0.01	1.38
0.6	7	319	0.006	0.005	217	8523	0.02	2.76
1.5	19	619	0.016	0.009	143	11657	0.14	4.33

Tout d’abord, notons que les deux modèles donnent exactement les mêmes résultats d’un point de vue qualitatif. La différence réside dans les temps de calcul, le cas 1D et 2D étant différents, ils seront commentés séparément dans les lignes suivantes :

Cas 1D :

Lorsque la cohérence est nulle, un seul point source est utilisé par le modèle d’Abbe, par conséquent il n’y a qu’une seule itération (une seule transformée de Fourier inverse). En revanche, le nombre de TCC est de 169, c’est-à-dire qu’il existe 169 quadruplés $(f', g'; f'', g'')$ tels que $TCC(f', g'; f'', g'')$ est non nul. Dans ce cas de figure, le modèle d’Hopkins est plus lent que celui d’Abbe. Cependant, dès que le degré de cohérence augmente, le nombre de points sources augmente également, et le modèle d’Hopkins devient plus rapide. Le nombre de points sources augmente plus rapidement que le nombre de TCC en relatif.

Cas 2D :

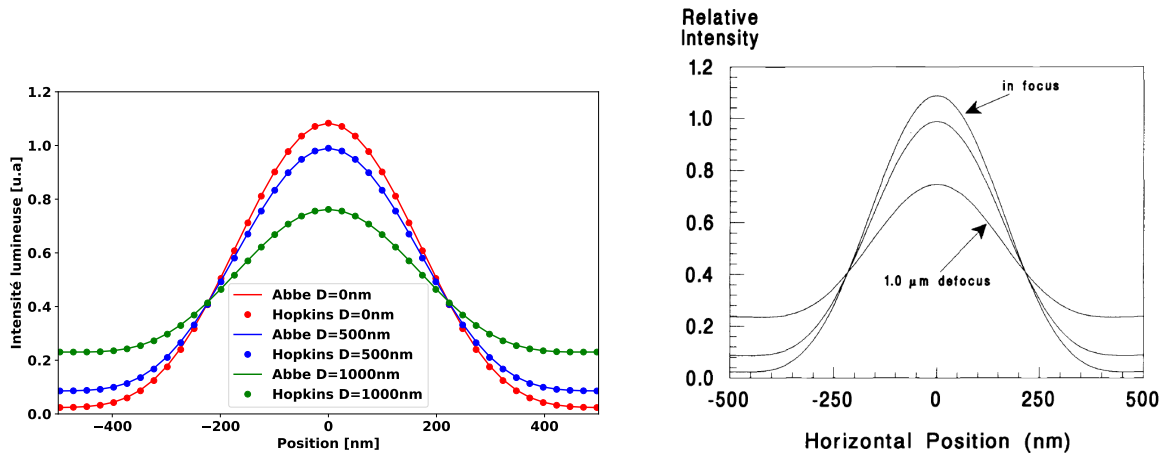
La première observation concerne les temps de calcul du modèle d’Hopkins qui ont fortement augmenté au regard du cas 1D. Le passage en 2D a fait augmenter le nombre de coefficients TCC de manière importante quelle que soit la valeur de cohérence de la source. Il est important de remarquer l’impact de la taille de la fenêtre de simulation. Cette dernière influe sur la discrétisation des supports en fréquence et le nombre de TCC à calculer.

Ligne-Espace

Autre classique de la littérature, le réseau de lignes-espaces [Mack, 1988]. Le masque est composé d’une alternance de lignes de chrome de 500nm et d’espaces de quartz de 500nm. Le temps de calcul pour chaque méthode sera évalué sous la forme d’une moyenne sur 100 itérations. Les paramètres de la simulation sont regroupés dans le tableau suivant :

	$[x_{min}, x_{max}]$	$[y_{min}, y_{max}]$	n_x	n_y
1D	[-2000nm, 2000nm]	-	161	-
2D	[-2000nm, 2000nm]	[-50nm, 50nm]	161	41

La longueur d’onde d’illumination est de 365nm, l’ouverture numérique de 0.53 et la cohérence de la source est fixée à 0.5. Cette fois-ci, on se propose de faire varier la valeur de defocus, ceci dans le but de comparer les prédictions des modèles à ceux de l’article [Mack, 1988].



(a) Courbes simulées avec le modèle d'Abbe et d'Hopkins.

(b) Courbes originales de l'article [Mack, 1988]

FIGURE 3.10 – Comparaison entre les images aériennes simulées par la méthode d'Abbe et d'Hopkins pour un masque type Lignes/Espaces de période 1000nm à différentes valeurs de defocus 3.10a. Les courbes sont comparées à un article de la littérature 3.10b.

Les temps de calcul en fonction du defocus sont regroupés dans le Tableau 3.3 ci-dessous :

TABLE 3.3 – Résultats de simulation du modèle Abbe et Hopkins pour un masque lignes/espaces en 1D et 2D en fonction de la valeur de defocus.

Defocus [nm]	N_S^{1D}	N_{TCC}^{1D}	t_{Abbe}^{1D} [s]	$t_{Hopkins}^{1D}$ [s]	N_S^{2D}	N_{TCC}^{2D}	t_{Abbe}^{2D} [s]	$t_{Hopkins}^{2D}$ [s]
0	5	205	0.006	0.004	5	1057	0.03	0.93
500	5	205	0.006	0.004	5	1057	0.03	0.84
1000	5	205	0.006	0.004	5	953	0.03	0.75

Dans le cas uni-dimensionnel, le temps de calcul est plus rapide avec l'approche d'Hopkins pour les mêmes raisons que celles discutées dans le cas du masque Heavyside. Dans le cas 2D, le nombre de points sources est relativement bas en comparaison du nombre de coefficients TCC. La méthode d'Abbe est à nouveau plus rapide que celle d'Hopkins.

On remarque de manière intéressante que le nombre de TCC a diminué pour un déphasage de 1000nm. Le déphasage vient modifier l'intégrale définie dans l'équation (3.16) et certains couples ne participent plus à la somme totale (cette observation est cohérente avec le fait que le contraste de l'image aérienne décroît avec l'augmentation du defocus). À defocus nul et à defocus 500nm, le nombre de TCC est de 1057. Le passage au defocus de 1000nm supprime 104 coefficients. Ces coefficients ne participent plus à la sommation de l'image finale.

3.1.7 Conclusion modèle optique

Que ce soit pour le modèle d'Abbe ou l'approche d'Hopkins, le calcul de l'image aérienne peut se résumer à une sommation de plusieurs contributions : les points sources pour Abbe et les coefficients TCC pour Hopkins. Avec la méthode Abbe, chaque itération (point source actif) nécessite le calcul d'une transformée de Fourier inverse, opération coûteuse numériquement. Avec la méthode d'Hopkins, chaque itération (coefficient TCC non nul) nécessite une multiplication de matrice, intrinsèquement moins coûteuse en temps de calcul.

Lorsque le nombre de coefficients TCC est relativement faible, ce qui est notamment le cas lorsque le masque est unidimensionnel, la méthode d'Hopkins est plus rapide que celle d'Abbe.

Bien que le nombre d'itérations soit plus important, chacune d'entre elle est plus rapide que les itérations du modèle d'Abbe. Le passage à un masque 2D se traduit par un renversement de cette tendance. Le nombre de coefficients TCC augmente énormément, et la relative rapidité de calcul de chaque itération ne parvient pas à supplanter le faible nombre d'itérations de l'approche d'Abbe.

Afin de nuancer ces propos, il est important de noter que le modèle d'Hopkins utilisé ici est la version sans approximation. Afin de réduire la complexité du calcul du modèle d'Hopkins il est possible d'utiliser des approches simplificatrices. La première est l'expansion en série de Fourier [Saleh and Rabbani, 1982, Ma and Arce, 2008]. Cette approche convertit le système optique incohérent en une somme de systèmes cohérents sur la base de la décomposition 2D en séries de Fourier. Une autre approche consiste à décomposer le système non pas en séries de Fourier mais en valeurs propres singulières [Cobb, 1995, Ma and Arce, 2009]. Lorsque le facteur de cohérence diminue, le système incohérent peut être approximé par une somme de systèmes cohérents dont les valeurs propres sont les plus importantes. Le but de ces méthodes est le même : réduire le nombre de coefficients TCC calculés tout en minimisant la perte de précision induite par cette opération.

Il est également possible d'utiliser une taille de grille différente (plus relâchée) pour la pupille que celle du masque de manière à accélérer le calcul. Cependant, cette approche nécessite l'utilisation de fonctions d'interpolations qui nuisent également à la qualité du résultat [Alpert et al., 2008].

Dans le cadre de la lithographie grayscale, la dimension des éléments de chrome sur le masque nous place souvent en limite de validité des modèles d'Hopkins et d'Abbe en absence d'approximations. Il n'est donc pas envisageable d'utiliser des approximations supplémentaires. C'est pour cette raison que le choix du modèle optique s'est tourné vers celui d'Abbe qui, à degré d'approximation équivalent, fournit les temps de calcul les plus rapides en 2D.

Chronologiquement, la première version utilisait la transformée de Fourier numérique pour calculer le spectre du masque. Cette approche est valide, cependant le maillage peut devenir très rapidement un facteur limitant (la finesse de maille doit s'adapter aux dimensions des plots de chrome : plus les plots sont petits, plus le maillage doit être fin). Le passage à la transformée de Fourier analytique a permis de repousser cette limitation. Avec cette dernière, il est possible d'utiliser un maillage relâché sans perte de précision. Par la suite, les expositions expérimentales ont été réalisées à plusieurs valeurs de focus. Cet effet a donc été rajouté au modèle. Enfin, afin d'étendre la gamme d'application du modèle jusqu'à des ouvertures numériques de 0.6, la correction d'obliquité a été implémentée (nécessaire car le NA du stepper est de 0.57).

3.2 Modèle résine

Une fois l'image aérienne du masque obtenue, le modèle résine va simuler la réponse de la résine à l'étape d'exposition puis à celle de développement. Les travaux sur la modélisation résine sont beaucoup plus récents que ceux sur les modèles optiques. L'exposition et le développement de la résine sont des phénomènes physico-chimiques complexes à modéliser. D'un point de vue historique, les procédés utilisés dans le cadre de cette thèse peuvent être qualifiés de «matures». Le stepper Canon iZ+ fonctionne sur une technologie développée dans les années 90 et la résine utilisée appartient à la famille des résines positive type Novolak dont le comportement est désormais bien connu. Par conséquent, le cadre théorique développé dans cette partie ne s'applique qu'au cas des résines positives de type novolak.

3.3 Simulation de l'exposition

Pour une résine Novolak positive (les régions exposées deviennent solubles dans le développeur) la simulation de l'exposition de la résine au cours de l'exposition peut, selon la description des articles de Dill [Dill, 1975, Konnerth and Dill, 1975, Dill et al., 1975a, Dill et al., 1975b], se limiter à l'étude de l'évolution de trois composantes :

- Le polymère Novolak avec ses propriétés et sa résistance au développeur.
- Le Composé Photo-Actif (Photo Active Compound) (PAC) qui est souvent du DNQ.
- Un solvant qui permet de faire coexister la résine et le PAC pour l'étalement de la résine.

Une résine Novolak est modérément soluble dans le développeur. Le rôle du PAC est de rendre cette solubilité quasi-nulle. Au cours de l'exposition, le PAC est converti en acide carboxylique. Par conséquent l'inhibition imposée par le PAC diminue, ce qui augmente la solubilité de la résine au développeur. Bien évidemment, la décomposition du PAC est rendue possible par sa sensibilité à l'illumination UV (longueur d'onde de 365nm dans notre cas).

D'un point de vue optique, la simulation de l'exposition revient à étudier l'évolution de l'absorption du film de résine au cours du temps. Cette dernière est notée $\alpha(x, y, z, t)$. La décomposition du PAC au cours de l'exposition a pour effet de diminuer l'absorption de la résine à l'illumination incidente.

Puisque c'est la face supérieure de la résine qui est soumise en premier à l'exposition, un gradient d'absorption va se créer dans la résine. Le haut de la résine devient «transparent» plus vite que le bas de la résine. Ce phénomène est appelé *bleaching*. Le changement d'absorption et la décomposition de l'inhibiteur sont modélisés par un modèle à trois paramètres.

En référence aux publications de Dill, ces paramètres sont appelés A , B et C . L'absorption de la résine avant exposition est donnée par la valeur de $A+B$. L'absorption après décomposition totale du PAC est égale à B . Le paramètre C quantifie la vitesse de décomposition du PAC en fonction de la dose reçue. Le coefficient d'absorption optique s'écrit :

$$\alpha(x, y, z, t) = Am(x, y, z, t) + B \quad (3.17)$$

où on a noté m la concentration de PAC normalisée relativement à sa valeur avant exposition :

$$m(x, y, z, t) = \frac{\bar{m}(x, y, z, t)}{\bar{m}(x, y, z, 0)} \quad (3.18)$$

m est aussi appelée *image latente*. Puisque le PAC se décompose au cours de l'exposition, la valeur maximale de \bar{m} est obtenue avant l'exposition. Par conséquent, la normalisation imposée par l'équation (3.18) signifie que m varie entre 1 (absence de décomposition) et 0 (décomposition totale) au cours de l'exposition. Avec cette convention, on retrouve les valeurs du coefficient d'absorption optique (3.17) pour les cas limites $m = 1$ et $m = 0$.

L'image aérienne obtenue en sortie du modèle optique correspond à l'intensité lumineuse normalisée reçue par la résine sur sa face supérieure. Cette dernière va se propager à travers le film de résine et subir des modifications. Le profil d'intensité dans la résine est appelé *image bulk*.

La Figure 3.11 ci-dessous schématise un empilement classique soumis à une exposition. Les indices optiques sont notés pour chaque couche : l'air (n_1), la résine (n_2) et le substrat (n_3).

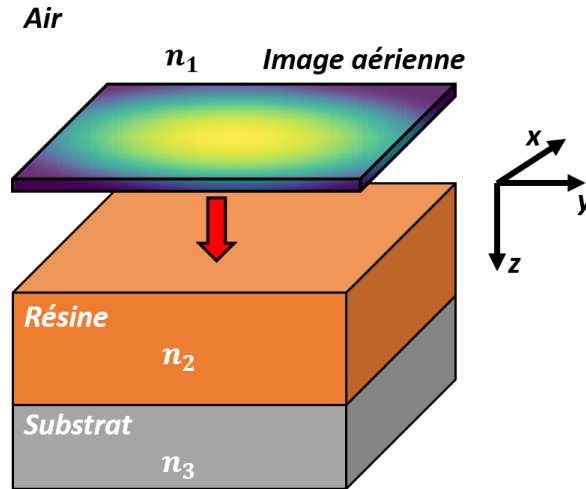


FIGURE 3.11 – Empilement illustrant la géométrie des couches et des indices optiques correspondants lors de l'exposition.

Calcul de l'image bulk :

Plusieurs méthodes sont possibles pour calculer l'*image bulk*, chacune présentant un compromis différent entre précision et temps de calcul.

L'approche la plus simple consiste à modéliser une absorption verticale de l'image aérienne au cours de sa propagation dans la résine selon une loi de Beer-Lambert [Lambert, 1760, Beer, 1852]. Cette formulation se traduit par l'équation suivante :

$$I(x, y, z; \alpha) = I_0(x, y)e^{-\alpha z} \quad (3.19)$$

I_0 correspond à l'image aérienne reçue par la face supérieure de la résine. Cette formulation ne prend pas en compte les effets des ondes stationnaires, néglige le coefficient de transmission entre l'air et la résine ainsi que le defocus subit par l'image aérienne au cours de sa propagation (les indices optiques n_1 , n_2 et n_3 sont supposés égaux).

Une formulation plus complète permettant de prendre en compte le defocus subit par l'image aérienne au cours de sa propagation dans l'épaisseur de résine est le modèle dit de *scaled defocus* [Bernard, 1988]. Avec ce modèle, l'image aérienne à une profondeur z dans la résine pour un focus machine D , est obtenue en simulant l'image aérienne à une valeur de defocus normalisée par l'indice de la résine («*scaled*») de $D - \frac{z}{n_2}$.

$$I_{SD}(x, y, z; \alpha) = I\left(x, y, D - \frac{z}{n_2}; \alpha\right) \quad (3.20)$$

Cette formulation nécessite un nombre beaucoup plus important d'appels au modèle optique que le modèle d'absorption simple : un par couche de résine dans la simulation.

Afin de réduire le nombre d'appels au modèle optique, il est possible d'utiliser le modèle Lumped Parameter Model (LPM) initialement proposé pour les cas 2D [Mack et al., 1987] puis en 3D [Byers et al., 2002]. Ce dernier décrit le changement de focus de l'image aérienne en plus de l'absorption à partir de 3 altitudes dans la résine. La formulation du modèle LPM est la suivante :

$$I(x, y, z; \alpha) = I_{LPM}(x, y, z)e^{-\alpha z} = [I_0(x, y) + I_1(x, y)z + I_2(x, y)z^2] e^{-\alpha z} \quad (3.21)$$

En notant l'épaisseur de résine d :

$$I_0(x, y) = I_{\text{top}}(x, y) \quad (3.22a)$$

$$I_1 = \frac{4e^{\frac{\alpha d}{2}} I_{\text{mid}}(x, y) - e^{\alpha d} I_{\text{bot}}(x, y) - 3I_{\text{top}}(x, y)}{d} \quad (3.22b)$$

$$I_2 = 2 \frac{I_{\text{top}}(x, y) + e^{\alpha d} I_{\text{bot}}(x, y) - 2e^{\frac{\alpha d}{2}} I_{\text{mid}}(x, y)}{d^2} \quad (3.22c)$$

I_0 correspond à l'image aérienne au sommet de la résine, I_1 à la variation linéaire de l'image aérienne avec la profondeur et I_2 à la variation quadratique de l'image aérienne avec la profondeur. La formulation du modèle LPM (3.21) nécessite trois calculs d'images aériennes. Cependant, le modèle LPM n'est que très peu représenté dans la littérature en dehors des articles de l'auteur. Par conséquent, ce modèle ne sera pas utilisé dans le cadre de la thèse.

Concernant les ondes stationnaires, [Mack, 1986, Mack, 2008] propose une formulation analytique permettant de les prendre en compte. Chaque matériau est décrit par son indice optique complexe : $\mathbf{n} = n + i\kappa$ où n correspond à l'indice optique réel et κ à la partie imaginaire (coefficient d'extinction). Ce coefficient est directement relié au coefficient d'absorption α :

$$\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda} \quad (3.23)$$

Avant d'introduire l'équation permettant de prendre en compte les ondes stationnaires il est nécessaire de rappeler les formulations du coefficient de transmission τ_{ij} et de réflexion ρ_{ij} entre une interface i et j :

$$\tau_{ij} = \frac{2\mathbf{n}_i}{\mathbf{n}_i + \mathbf{n}_j} \quad \rho_{ij} = \frac{\mathbf{n}_i - \mathbf{n}_j}{\mathbf{n}_i + \mathbf{n}_j}$$

Lorsque les ondes stationnaires sont prises en compte, la variation d'intensité dans la résine selon z est donnée par la formule suivante :

$$I(z) = \frac{n_2 |E(z)|^2}{n_1 |E_I|^2} \quad (3.24)$$

où on a noté $E(z)$ le champ électrique dans la résine en fonction de z (onde plane) pour un point (x, y) et E_I le champ électrique incident au niveau de ce point en $z=0$. En développant cette expression on obtient :

$$I(z) = T_{\text{eff}} \left[\left(e^{-\alpha z} + |\rho_{23}|^2 e^{-\alpha(2d-z)} \right) + 2|\rho_{23}| e^{-\alpha d} \cos \left(4\pi n_2 \frac{(d-z)}{\lambda} + \Phi_{23} \right) \right] \quad (3.25)$$

Avec $\rho_{23} = |\rho_{23}| e^{i\Phi_{23}}$ et T_{eff} :

$$T_{\text{eff}} = \frac{\frac{n_2}{n_1} |\tau_{12}|^2}{|1 + \rho_{12} \rho_{23} \tau_D^2|^2} = \frac{T_{12}}{|1 + \rho_{12} \rho_{23} \tau_D^2|^2}$$

Il est possible d'étendre cette formulation à un nombre de couches plus grand en utilisant une formulation à base de matrice de transfert. On remarque qu'en posant $\mathbf{n}_2 = \mathbf{n}_3$, on obtient $\rho_{23} = 0$. L'équation (3.25) se simplifie dans ce cas et on retrouve l'expression 3.19 :

$$I(z) = T_{12} e^{-\alpha z} \quad (3.26)$$

La Figure 3.12 ci-dessous illustre l'évolution de l'intensité lumineuse à travers l'épaisseur de résine pour une onde plane parallèle à la surface du substrat. Les ondes stationnaires sont visibles en rouge tandis que l'absorption verticale est tracée en noir.

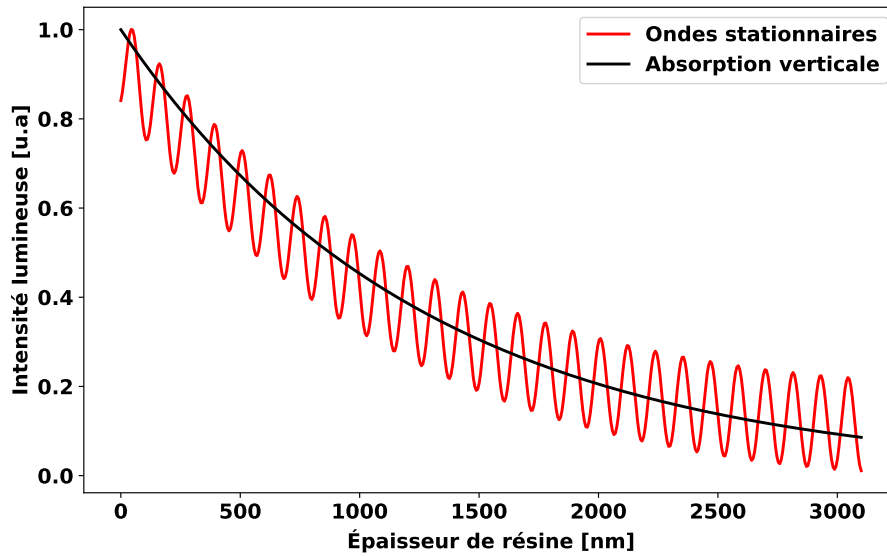


FIGURE 3.12 – Intensité lumineuse à travers l'épaisseur de résine. L'absorption est visible en noir, les ondes stationnaires en rouge.

Nous n'avons donné ici qu'un aperçu permettant de simuler les ondes stationnaires. En réalité, l'expression (3.25) n'est valable que pour une onde plane à incidence directe. Lorsqu'une onde plane n'est pas parallèle à la surface du substrat la période et l'amplitude des ondes stationnaires sont modifiées. Une autre formulation prenant en compte la polarisation de la lumière est nécessaire. Ces aspects sont discutés dans [Mack, 2008].

Calcul de l'image latente :

L'évolution de la concentration de PAC et de l'image bulk dans la résine au cours de l'exposition sont données par les équations du modèle de Dill [Dill et al., 1975a] :

$$\frac{\partial m(x, y, z, t)}{\partial t} = -C \cdot I(x, y, z, t) \cdot m(x, y, z, t) \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial I(x, y, z, t)}{\partial z} = -[A \cdot m(x, y, z, t) + B] I(x, y, z, t) \quad (3.28)$$

Il est possible de donner une solution analytique à ces équations sous une forme intégrale [Herrick, 1966, Babu and Barouch, 1986, Mack, 1987] en supposant que l'image aérienne ne subit que le phénomène d'absorption lors de sa propagation dans la résine. On peut alors intégrer les équations (3.28) et (3.27).

$$z = \int_{m(z=0)}^{m(z)} \frac{dy}{y[A(1-y) - B \ln(y)]} \quad (3.29a)$$

$$I(z) = I(0) \frac{A[1 - m(z)] - B \ln[m(z)]}{A[1 - m(0)] - B \ln[m(0)]} \quad (3.29b)$$

où y est une variable muette. Pour résoudre totalement la version analytique de ces équations il est encore nécessaire de faire une nouvelle approximation : $A \gg B$. Cette hypothèse vraisemblable au début d'exposition n'est pas vraie pendant toute l'exposition. Cela revient à négliger le phénomène de bleaching de la résine.

Dans le cadre de cette thèse, il n'est pas possible de réaliser toutes ces hypothèses. Le calcul direct de l'évolution de l'image latente et bulk en utilisant les équations (3.27) et (3.28) doit être réalisé itérativement en se basant sur des considérations cinétiques. Afin de simplifier le calcul, l'exposition totale est discrétisée temporellement en intervalles Δt [Mack, 1997, Matsuzawa et al., 1987]. L'image latente et bulk sont calculées alternativement en supposant que l'autre n'évolue pas pendant l'intervalle de temps d'intégration Δt . Cette hypothèse permet d'intégrer les équations (3.27) et (3.28) :

$$m(x, y, z, t + \Delta t) = m(x, y, z, t)e^{-C \cdot I(x, y, z, t)\Delta t} \quad (3.30)$$

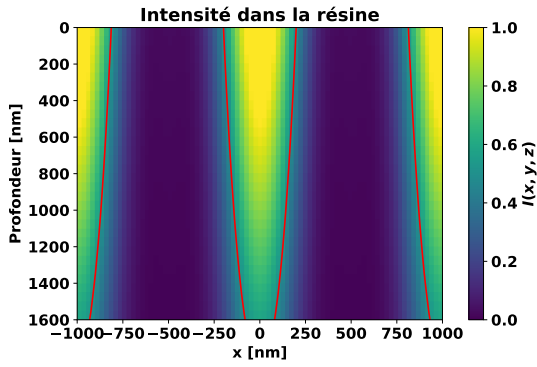
$$I(x, y, z, t + \Delta t) = I(x, y, z; \alpha = A \cdot m(x, y, z, t) + B) \quad (3.31)$$

Cette méthode de calcul itérative est possible puisque la cinétique est très différente entre (3.27) et (3.28). La lumière évolue beaucoup plus rapidement que les réactions chimiques dans la résine. L'image latente calculée à un temps $t + \Delta t$ est dépendante de l'image bulk et de l'image latente au temps t . L'image bulk calculée à un temps $t + \Delta t$ est seulement dépendante de l'image latente au temps t et pas de l'image bulk au temps t . Les étapes du calcul de l'exposition sont résumées ci-dessous :

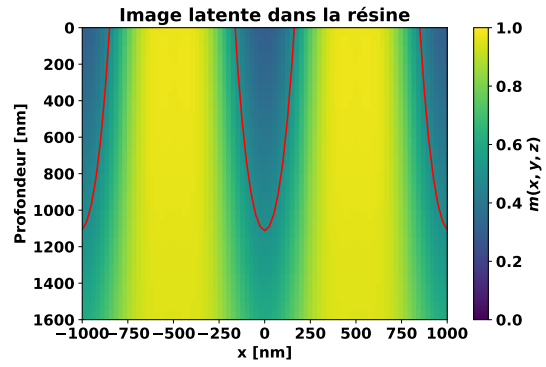
1. Instanciation du temps à zéro : $t \rightarrow 0$
2. Calcul de l'image bulk initiale à partir de l'équation (3.31) (avec prise en compte du defocus, des ondes stationnaires ou non).
3. Mise à jour de l'image latente avec l'équation (3.30).
4. Mise à jour de l'image bulk avec l'équation (3.31) (avec prise en compte du defocus, des ondes stationnaires ou non).
5. Incrément de Δt au temps total : $t \rightarrow t + \Delta t$
6. Répétition de l'étape 3 à 5 jusqu'à ce que $t = t_{\text{expo}}$

Une fois la simulation terminée, l'image latente $m(x, y, z, t = t_{\text{expo}})$ est connue, ce qui correspond à la concentration finale de PAC dans la résine.

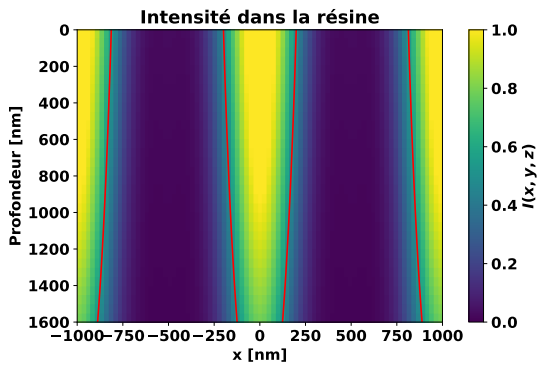
La Figure 3.13 illustre l'évolution de l'image bulk et de l'image latente au cours de l'exposition pour un masque ligne/espace de période 500nm. Toutes les images sont des vues en coupe dans le plan x/z où z est la profondeur de la résine. Sur chaque image, un contour rouge est dessiné. Ce contour correspond à la frontière entre les zones supérieures à 0.5 et celles inférieures à 0.5, que ce soit en image bulk ou latente (puisque les deux sont exprimées entre 0 et 1).



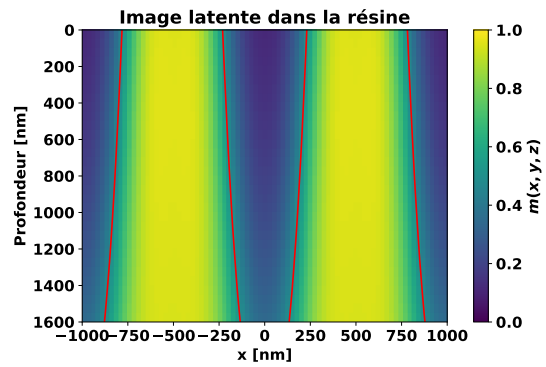
(a) Image bulk à $t = \frac{t^{tot}}{4}$



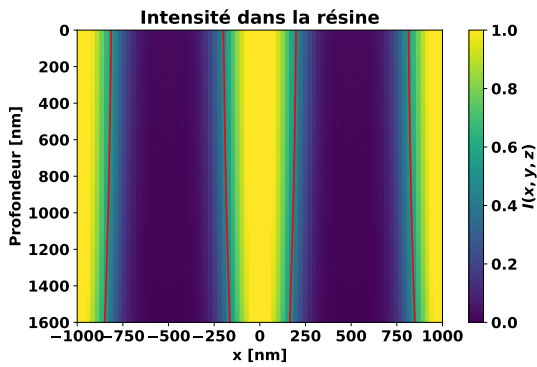
(b) Image latente à $t = \frac{t^{tot}}{4}$



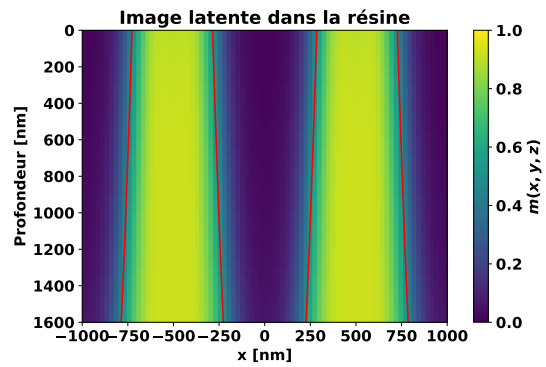
(c) Image bulk à $t = \frac{t^{tot}}{2}$



(d) Image bulk à $t = \frac{t^{tot}}{2}$



(e) Image bulk à $t = t^{tot}$



(f) Image latente à $t = t^{tot}$

FIGURE 3.13 – Évolution de l'image bulk et latente au cours du temps d'exposition t^{tot} . La ligne rouge sépare les valeurs supérieures à 0.5 de celles inférieures à 0.5.

3.4 Simulation du développement

Le modèle de développement est basé sur la connaissance de la concentration finale de PAC dans la résine après l'étape d'exposition et de la nature chimique de la résine et du développeur utilisé. En pratique, la nature chimique est considérée invariante de manière à pouvoir traiter l'étape de développement seulement à partir de la concentration de PAC.

Le première approche proposée pour traiter le développement est le modèle dit «à seuil». À l'issue de l'étape de développement, la résine est séparée en deux états en fonction de la valeur de l'image latente : les points de résine pour lesquels l'image latente est inférieure à une concentration seuil notée M_{th} sont considérés comme solubles dans le développeur alors que les autres points ne le sont pas. Le profil résine correspond donc à l'enveloppe de points séparant la zone développée de celle non développée. Cette approche rapide permet d'obtenir une estimation du profil résine mais ne permet pas de traiter le développement rigoureusement (pas de prise en compte de l'horizontalité du développement). Le modèle à seuil peut être vu comme une approximation brute de l'étape de développement.

Bien évidemment, l'étape développement est un phénomène 3D. Afin de prendre en compte ces aspects, [Sethian, 1996a] propose de modéliser l'action du développeur par la propagation d'un front de développement (correspondant au développeur liquide) à travers l'épaisseur de résine. Le front se déplace perpendiculairement à la surface de résine et ne peut pas revenir en arrière. Dans le cas de la lithographie, la vitesse du front de développement est une fonction empirique ne dépendant que de la position. Cette fonction notée $R(x, y, z)$ est appelée taux de développement. Elle dépend de la résine et du développeur utilisé.

Le taux de développement est positif en tout point, le front de développement ne peut donc qu'avancer. Dans ce cas, le problème peut être considéré comme stationnaire (ne dépendant pas du temps). Soit un front de développement 3D, on pose $T(x, y, z)$ le temps auquel le front atteint le point (x, y, z) . La surface $T(x, y, z)$ vérifie l'équation suivante :

$$|\nabla T(x, y, z)|R(x, y, z) = 1 \quad (3.32)$$

Cette équation signifie que le gradient du temps d'arrivée est inversement proportionnel à la vitesse du front. Cette équation est bien connue en optique puisqu'il s'agit de l'équation Eikonale, qui est un type d'équation Hamilton-Jacobi. L'objectif est donc de résoudre l'équation suivante :

$$|\nabla T(x, y, z)| = \frac{1}{R(x, y, z)} \quad (3.33)$$

soit :

$$\sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} = \frac{1}{R(x, y, z)} \quad (3.34)$$

La surface $T_d(x, y, z) = t_d$ donne le profil de résine développé au temps t_d correspondant au temps de développement (le temps pendant lequel la résine est en contact avec le développeur liquide).

3.4.1 Fonctions de développement

Il existe plusieurs fonctions de développement nécessitant plus ou moins de paramètres pour fonctionner. Nous ne citerons ici que deux modèles, celui de Smith et celui de Mack à 4 paramètres.

Modèle de Smith [Smith et al., 2002]

Cette fonction de développement est intéressante puisqu'elle s'exprime non pas en fonction de la concentration finale de PAC, mais en fonction de l'image bulk finale dans la résine :

$$R(x, y, z, E) = R_0 \left[\frac{E \cdot I(x, y, z, t = t_{tot})}{E_0} \right]^\gamma + R_{min} \quad (3.35)$$

Où R_{min} correspond au taux minimum de développement : c'est la vitesse à laquelle la résine se développe en absence d'exposition. E_0 est la dose à partir de laquelle la résine est totalement développée. γ le contraste de la résine. R_0 est une constante dépendant du coefficient d'absorption optique α de l'épaisseur de résine d , du contraste résine γ et du temps de l'étape de développement t_{dev} :

$$R_0 = \frac{1}{t_{dev} \alpha \gamma} (e^{\alpha d \gamma} - 1) \quad (3.36)$$

Modèle de Mack à 4 paramètres [Mack, 1998]

C'est la fonction de développement la plus couramment utilisée en lithographie.

$$R(x, y, z) = R_{max} \frac{(a + 1)(1 - m(x, y, z))^n}{a + (1 - m(x, y, z))^n} + R_{min} \quad (3.37)$$

R_{max} correspond au taux maximum de développement. n est la sélectivité du développeur à la résine. R_{min} correspond au taux minimum de développement : c'est le phénomène de *dark erosion* abordé au chapitre 1. Même si la résine n'est pas exposée ($m(x, y, z) = 1$), la valeur de $R(x, y, z)$ n'est pas nulle mais égale à R_{min} : en attendant suffisamment longtemps la résine serait complètement développée. a est une constante qui dépend de la concentration seuil d'inhibiteur m_{th} et de n :

$$a = \frac{n + 1}{n - 1} (1 - m_{th})^n \quad (3.38)$$

C'est le modèle de Mack à 4 paramètres qui a été utilisé pendant la thèse. L'utilisation de ce modèle sera discutée au chapitre 4.

3.4.2 Résolution de la fonction de développement

La première manière de résoudre l'équation (3.33) est de négliger les composantes en x et en y . C'est l'hypothèse de développement 1D déjà discutée au chapitre 1. L'équation (3.34) devient alors :

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{R(x, y, z)}$$

Par simple intégration selon z on obtient :

$$T(x, y, z) = \int_0^d \frac{dz}{R(x, y, z)} \quad (3.39)$$

Afin de résoudre totalement l'équation (3.34) en 3D, la méthode de fast marching développée par [Sethian, 1996b] est utilisée. Cette approche est déjà implémentée dans une librairie Python [Scikit-fmm, 2020] et sera donc utilisée directement.

3.4.3 Comparaison du modèle de développement 1D et 3D

La Figure 3.14 ci-dessous compare un profil résine à différents instants de son développement pour un modèle purement vertical 1D (z) et un modèle de développement 3D (x , y et z). Le modèle de développement de Mack est utilisé (3.37), avec les paramètres suivants : $m_{th} = 0.0022$, $r_{min} = 3.02$, $r_{max} = 50.21$ et $n = 3.08$.

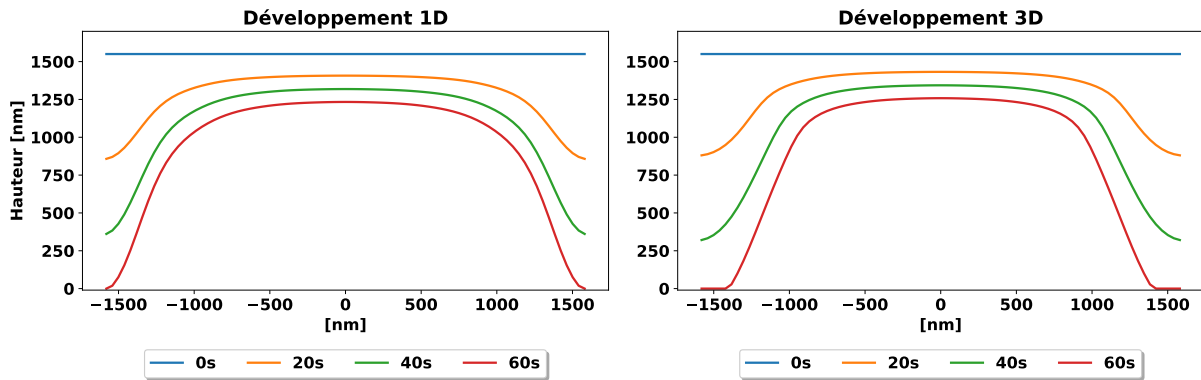


FIGURE 3.14 – Visualisation d’un profil résine à différentes étapes de son développement, pour un développement 1D (gauche) et un développement 3D (droite).

Afin de bien comprendre les différences induites par une prise en compte purement verticale du développement de la résine, les deux profils correspondant à 60s de développement de la Figure 3.14 précédente sont superposés sur la Figure 3.15 :

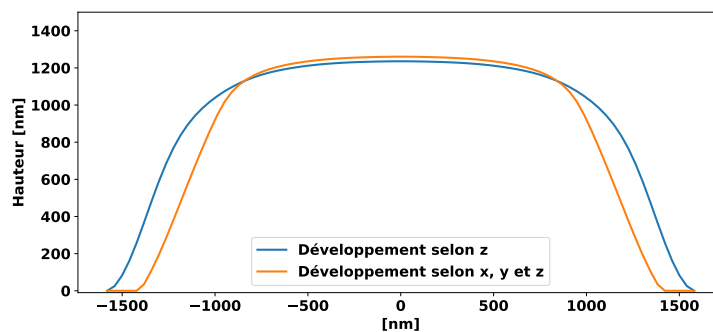


FIGURE 3.15 – Différences entre un développement purement vertical (courbe bleue) et un développement prenant en compte l’horizontalité (courbe orange).

Les profils des Figures 3.14 et 3.15 correspondent à des dimensions et des formes visées dans le cadre de cette thèse. Des erreurs de plusieurs centaines de nanomètres peuvent être induites par l’utilisation du modèle de développement 1D pour prédire un profil résine. Lorsque les profils résines recherchés sont beaucoup plus grands, le modèle de développement 1D peut suffire à décrire la forme finale de résine.

3.4.4 Conclusion modèle résine

Alors que le modèle optique s’appuie en grande partie sur un cadre théorique rigoureux, nous avons vu que le modèle résine repose en partie sur des équations semi-empiriques. Les résultats fournis par le modèle résine sont extrêmement dépendants de son degré de complexité. Il est tentant de vouloir développer le modèle résine le plus poussé possible. Cependant, les temps de calcul nécessaires à une modélisation peuvent rapidement devenir un facteur limitant.

Le modèle résine a été développé après le développement du modèle optique. Initialement, le modèle était purement vertical, tant pour la simulation de l’exposition que pour l’étape de développement. Plus tard, le développement 3D résolu par fast-marching a été implémenté. La prise en compte de l’effet de defocus lors de la propagation dans la résine et les effets des ondes stationnaires n’ont été étudiés qu’en fin de thèse par manque de temps et n’ont pas pu être

utilisés pour la suite des travaux.

Rappelons à nouveau que les modèles seront utilisés dans le cadre de l'optimisation de masque. Par conséquent, le modèle résine recherché doit fournir le meilleur compromis entre rapidité et précision de modélisation. L'utilisation du modèle photolithographique sera discuté dans le cadre de la calibration du modèle de développement au chapitre suivant 4 et de l'optimisation de masque grayscale au chapitre 5. Au moment de traiter la calibration du modèle de développement le degré de complexité du modèle résine était le suivant :

- ☑ Traitement de l'exposition en considérant seulement l'absorption verticale de l'image aérienne dans la résine selon l'équation (3.19).
 - ☒ Defocus de l'image aérienne dans la profondeur de résine non pris en compte (3.21).
 - ☒ Phénomène d'ondes stationnaires non pris en compte (3.25).
- ☑ Développement 3D de la résine avec fonction de développement Mack (3.37).

3.5 Périodicité du modèle : notion de densité

Un vocabulaire particulier est introduit afin de décrire l'agencement des masques entre-eux. Le terme *dense* sera utilisé lorsque le masque est répété périodiquement horizontalement et verticalement, de manière à générer un maillage régulier de la forme souhaitée. En revanche, si le masque n'est pas répété, ou si la période de répétition est suffisamment grande, le terme *isolé* sera utilisé. La Figure 3.16 illustre la différence entre un masque isolé et un masque dense.

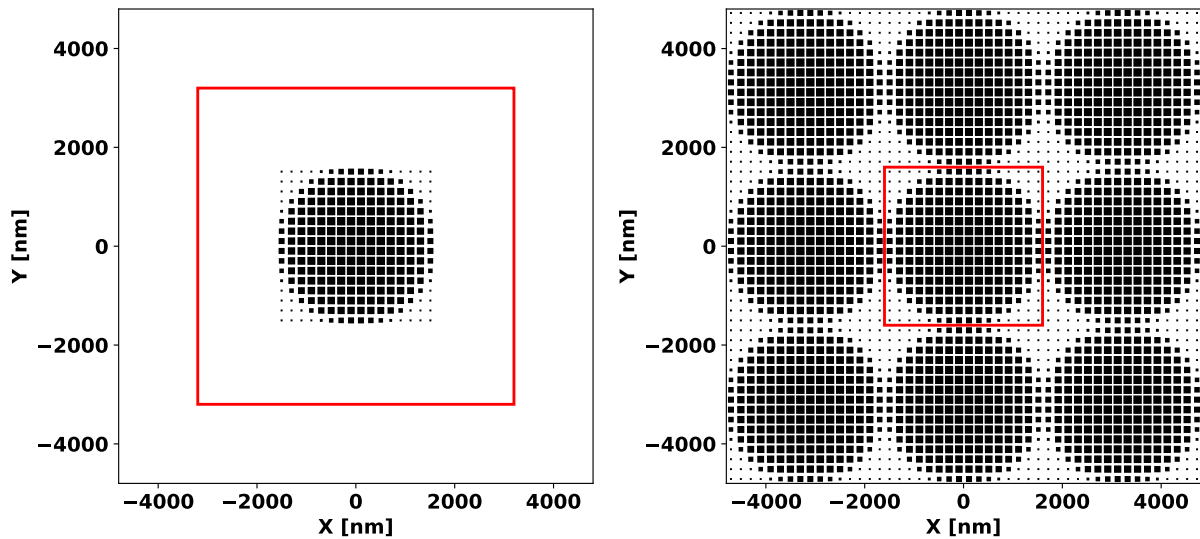


FIGURE 3.16 – Masque isolé (gauche) et dense (droite). Le rectangle rouge correspond à la maille élémentaire du masque utilisée pour la simulation du profil résine.

Les modèles optique et résine étant périodiques (transformée de Fourier), il est nécessaire de prendre une fenêtre plus grande que le masque lorsqu'un motif isolé doit être traité. En traitement du signal cela correspond à un *zero padding*. La largeur de la zone de padding doit être sélectionnée de manière à empêcher deux motifs voisins de s'impacter mutuellement.

La Figure 3.17 illustre les profils résines obtenus avec les masques de la Figure 3.16.

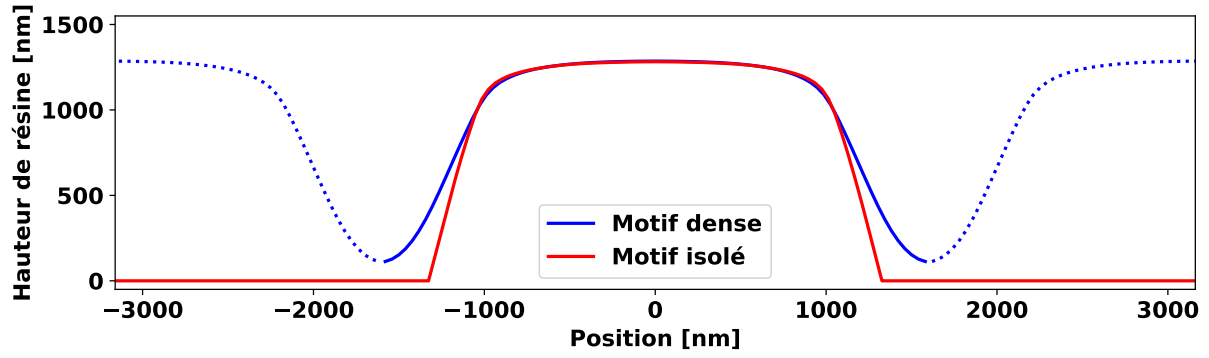


FIGURE 3.17 – Profil résine le long de l'axe x ($y=0$) pour un masque traité en configuration isolée ou dense.

Le profil en pointillé correspond aux motifs voisins implicitement pris en compte par la périodicité lors de la simulation.

Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, les modèles optique et résine développés dans le cadre de cette thèse ont été présentés. Ces deux modèles combinés permettent de modéliser le résultat d'une étape de lithographie, en particulier de la lithographie grayscale. Afin de pouvoir rendre compte des profils obtenus expérimentalement ces modèles nécessitent la définition de plusieurs paramètres. L'ensemble des paramètres nécessaires à la modélisation sont résumés dans le Tableau 3.4 ci-dessous.

TABLE 3.4 – État des lieux des connaissances des paramètres du modèle optique et résine au début de la thèse.

	Optique	Résine
λ	✓	
σ	✓	
NA	✓	
polarisation	✓	
dill A		✓
dill B		✓
dill C		✓
r_{min}		✗
r_{max}		✗
m_{th}		✗
n		✗

Dans le cas des paramètres du modèle optique, ces derniers sont directement accessibles depuis l'équipement de lithographie en salle-blanche. Ils sont donc connus. En revanche, les paramètres du modèle résine dépendent de la formulation chimique de cette dernière. Avant de pouvoir utiliser le modèle complet il est donc nécessaire de déterminer la totalité des paramètres nécessaires au fonctionnement du modèle résine. Afin de pouvoir déterminer ces paramètres une calibration numérique du modèle de développement a été réalisée. Cet aspect fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 4

Réalisation et exploitation du masque FISH

Résumé du chapitre

Afin de commencer l'étude expérimentale de la lithographie grayscale, un masque (nom de code : FISH) a été réalisé en début de thèse en se basant sur les approches de création de masque de la littérature. Le masque intégrait une pluralité de pixellisations réalisées sans aucune connaissance du procédé ni de la résine.

Ce masque devait répondre à trois objectifs. Le premier était d'évaluer l'approche de construction de masque PWM pour réaliser des microstructures dont les dimensions sont inférieures à $2\mu\text{m}$. Ce masque a également permis d'évaluer deux résines candidates pour les applications grayscale. Enfin, les profils expérimentaux obtenus avec ce masque ont été utilisés afin de calibrer le modèle de développement décrit dans le chapitre précédent. En effet, les deux résines sont fournies avec des paramètres établis par le fabricant à des conditions d'exposition et de développement données. Les paramètres décrivant la réponse de la résine à l'étape d'exposition lui sont intrinsèques et peuvent donc être utilisés directement. En revanche, les paramètres du modèle de développement sont dépendants du procédé et doivent donc être déterminés numériquement à l'aide de profils réels.

Ce chapitre débutera par la description de la méthodologie utilisée pour créer le masque : les hypothèses ainsi que le processus de création d'un masque grayscale à partir d'une forme résine donnée seront détaillés. Dans un second temps, les masques principaux ayant servi à l'évaluation des résines et à la calibration du modèle de développement seront présentés. Les conditions de procédés ainsi que les différents équipements de métrologie utilisés pour mesurer les profils résines seront introduits. La sélection de la résine et de l'empilement sera commentée. Enfin, l'exploitation de ces résultats à travers le processus de calibration sera décrite et la qualité de la calibration discutée. Une grande partie de ce travail a fait l'objet d'une publication dans le cadre de la conférence SPIE Advanced Lithography [Chevalier et al., 2019].

4.1 Méthodologie de création de FISH

Dans cette section, la méthodologie de création de FISH est décrite en détail.

Remarque

Afin d'éviter toute confusion, l'appellation FISH sera utilisée pour désigner le masque dans son ensemble. Les termes «masques», «masques grayscale» ou «pixellisations» seront utilisés de manière équivalente pour désigner les contributions élémentaires sur FISH.

En terme de construction, le choix s'est porté sur des masques grayscale à période fixe entre les plots de chrome (PWM), hérités des développements préliminaires réalisés à STMicroelectronics [Audran, 2007]. Les plots de chrome sont carrés et disposés sur une grille régulière de période 200nm en x et y . Ce choix est obtenu en utilisant la formule (2.5) (page 41) avec les valeurs de l'article :

$$p_{max} = \frac{1}{1 + \sigma} \frac{\lambda}{NA} = \frac{1}{1 + 0.35} \frac{365}{0.6} = 450nm \quad (4.1)$$

Par conséquent la dimension du plot de chrome maximale est égale à la moitié de cette valeur soit 225nm, arrondi à 200nm pour s'accorder aux dimensions des cibles résines. Le profil résine est divisé selon le même type de grille de manière à obtenir une correspondance entre une cellule sur le masque et une cellule au niveau du profil résine. Le découpage d'un profil résine et de son masque est illustré sur la Figure 4.1 ci-dessous :

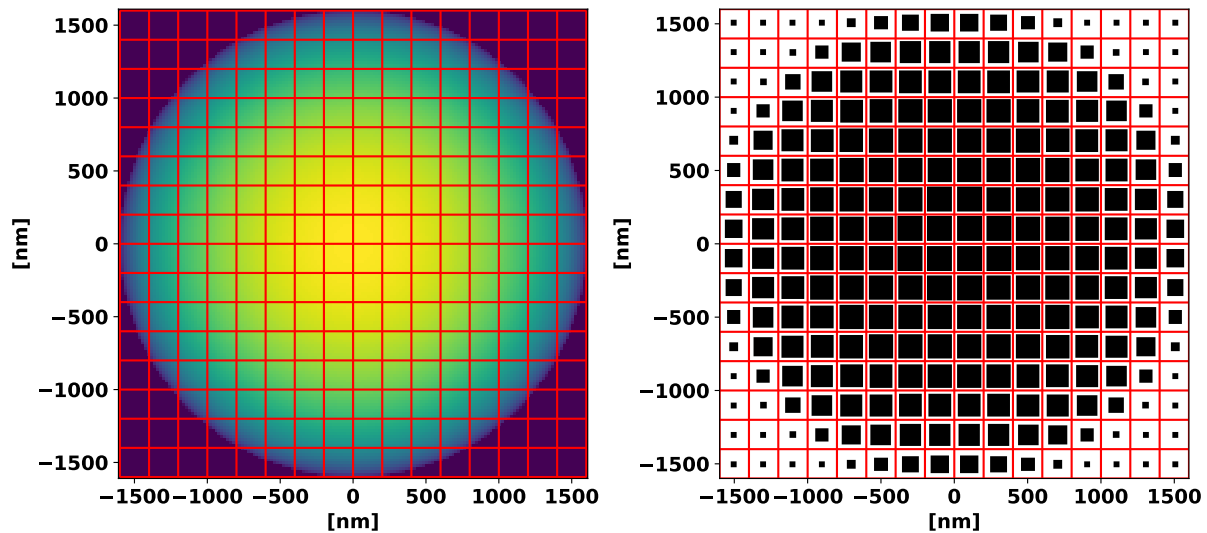


FIGURE 4.1 – Visualisation d'une cible résine de microlentille et du masque associé. Le découpage en cellules est visible par l'intermédiaire du quadrillage rouge.

Dans chaque cellule, la taille du plot de chrome est bornée par les capacités du fabricant de masque (la totalité des masques présentés dans cette thèse ont été manufacturés par Toppan). Ce dernier fournit des spécifications détaillées permettant de générer un masque réalisable par ses équipements d'écriture e-beam. Deux valeurs sont particulièrement importantes dans le cas d'un masque grayscale : le minCD qui donne la plus petite taille de carré de chrome atteignable et le minSPACE qui renseigne sur l'espacement le plus petit réalisable entre deux plots de chrome.

Dans notre cas ces valeurs sont respectivement de 40nm et 30nm à l'échelle 1X¹. Transposées

1. Terme désignant l'échelle au niveau du substrat. Les dimensions sur le masque sont 4 fois plus grandes. On parle alors de 4X.

à notre géométrie de masque, ces limitations se traduisent par des tailles de plots de chrome pouvant varier entre 40 et 170nm (1X) de côté. Sur le cas spécifique de la Figure 4.1, les plus petits plots de chrome sont sur la périphérie, tandis que les plus gros sont situés sur le centre.

En utilisant l'expression de la densité de chrome (2.1) (page 37) et les limitations du fabricant de masque, il est possible de borner la gamme de densité de chrome atteignable dans chaque cellule :

$$0.04 = \frac{40^2}{200^2} = \left(\frac{CD_{\min}}{\text{pitch}}\right)^2 = D_{\min} \leq D \leq D_{\max} = \left(\frac{CD_{\max}}{\text{pitch}}\right)^2 = \frac{170^2}{200^2} = 0.7225 \quad (4.2)$$

où on a noté $CD_{\max} = \text{pitch} - \min_{\text{space}}$. Ne disposant pas d'un modèle optique à ce stade de la thèse, un modèle simplifié a été utilisé. Ce modèle reprend la formulation (2.6) (page 41) en retirant la dépendance quadratique. L'intensité lumineuse de la cellule située à la m-ième ligne et de la n-ième colonne s'écrit :

$$I[m, n] = 1 - D[m, n] \quad (4.3)$$

La densité de chrome étant bornée (4.2), l'intensité lumineuse reçue est également bornée d'après la formule (4.3). La Figure 4.2 ci-dessous représente l'équation (4.3). La zone hachurée correspond aux densités de chrome acceptables $[D_{\min}, D_{\max}]$, qui définissent l'intensité lumineuse maximale I_{\max} et minimale reçues I_{\min} .

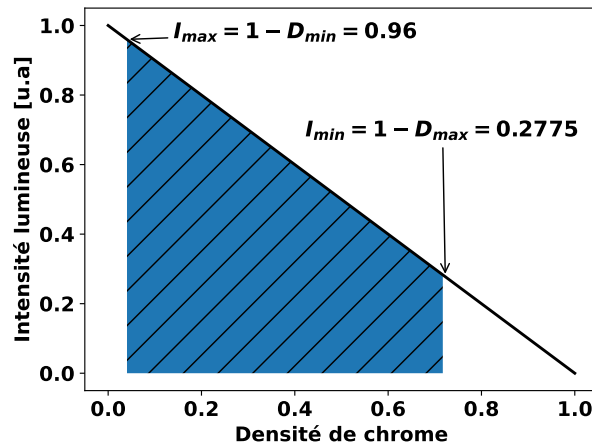


FIGURE 4.2 – Relation entre densité de chrome sur le masque et intensité lumineuse reçue au niveau de la résine. L'aire hachurée correspond aux limites de la densité de chrome qui se traduisent par une limite sur les valeurs d'intensité lumineuse.

Concernant le modèle résine, une approche à base de courbe de contraste analytique a été utilisée. Deux formulations ont été retenues : l'une à base d'une fonction exponentielle h^{exp} et l'autre linéaire² h^{lin} . Les relations sont construites de manière à couvrir toute la gamme de hauteur normalisée entre 0 et 1 pour la gamme d'intensité lumineuse définie par les densités minimales et maximales de chrome définies en (4.2).

$$h^{exp}[m, n] = \frac{e^{\left[1 - \left(\frac{CD_{\min}}{\text{pitch}}\right)^2 - I[m, n]\right]} - e^{\left[\left(\frac{CD_{\min}}{\text{pitch}}\right)^2 - \left(\frac{CD_{\max}}{\text{pitch}}\right)^2\right]}}{1 - e^{\left[\left(\frac{CD_{\min}}{\text{pitch}}\right)^2 - \left(\frac{CD_{\max}}{\text{pitch}}\right)^2\right]}} \quad (4.4a)$$

$$h^{lin}[m, n] = \frac{I[m, n] + \left(\frac{CD_{\min}}{\text{pitch}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{CD_{\min}}{\text{pitch}}\right)^2 - \left(\frac{CD_{\max}}{\text{pitch}}\right)^2} \quad (4.4b)$$

2. La principale courbe de contraste utilisée pour construire les pixellisations de FISH est la linéaire. La courbe de contraste exponentielle a été seulement utilisée pour certains motifs de microlentilles.

Ces expressions sont tracées sur la Figure 4.3 ci-dessous :

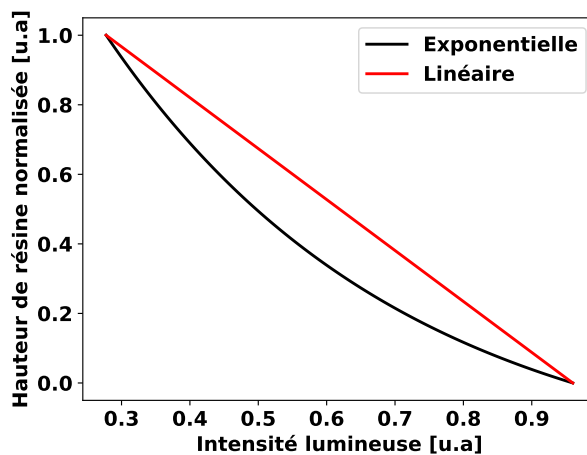


FIGURE 4.3 – Courbes de contraste linéaire (4.4b) et exponentielle (4.4a). La hauteur de résine est normalisée entre 0 et 1.

Le principe de l'algorithme de génération d'un masque est le suivant :

1. Chargement du profil résine cible sous forme d'une matrice 2D.
2. Division de la matrice du profil en cellules de 200nm de côté (4.1) et calcul de la hauteur moyenne de résine dans chacune de ces cellules.
3. Pour chaque cellule la hauteur moyenne de résine est convertie en intensité lumineuse en utilisant la relation (4.4a).
4. Une fois l'intensité calculée le plot de chrome est placé dans la cellule correspondante sur le masque avec la taille adéquate en fonction de la densité de chrome calculée à partir de la fonction (4.3).
5. L'opération est répétée pour toutes les cellules du masque.
6. Une fois l'opération terminée le masque est intégré sur FISH.

Cet algorithme de génération de masque a été utilisé pour générer la totalité des pixellisations présentes sur FISH. Cette méthodologie de construction de masque est similaire à certaines approches décrites dans le chapitre 2. Il était certain à ce stade de la thèse que cette approche ne serait pas suffisante pour obtenir les profils les plus complexes dans la résine. Néanmoins, la réalisation de FISH est une étape essentielle afin de comprendre le comportement des résines à l'illumination grayscale lorsque la densité de chrome varie rapidement sur de faibles distances. Les observations expérimentales ont permis de sélectionner des résines et de nourrir la réflexion aboutissant au développement d'une nouvelle approche de préparation de masque grayscale.

4.2 Description des principaux masques embarqués sur FISH

Cette section illustre les principaux masques incorporés sur FISH ayant participé aux évaluations de résines et à la calibration du modèle de développement.

4.2.1 Microlentilles

Deux types de géométrie de microlentilles ont été incorporés sur FISH pour répondre aux problématiques imageurs. Une grande microlentille aussi appelée Large PhotoDiode (LPD) (du nom de la grande photo-diode enfouie sous cette dernière) et une petite microlentille Small PhotoDiode (SPD) respectivement de rayon 1600nm et 800nm. En réalité, les dimensions exactes des microlentilles imageurs sont de 1400nm et de 700nm. La différence est ici le résultat d'une mauvaise interprétation de l'agencement demandé en début de thèse. Néanmoins les dimensions retenues restent d'intérêt. Les agencements de masques de microlentilles sur FISH sont résumés dans le Tableau 4.1 ci-dessous³ :

TABLE 4.1 – Agencement de masques de microlentilles présents sur FISH.

	LPD	LPD/SPD
Isolé	✓	✗
Dense	✓	✓

Le terme isolé et dense fait référence à la Figure 3.16 (page 72). Il n'y a pas de différence de construction entre le masque isolé et le masque dense. Ce dernier est simplement un maillage en trois par trois du masque isolé.

Le terme SPD/LPD désigne un agencement dense et en quinconce de la LPD et de la SPD correspondant à la Figure 2.5 (page 34). Les 3 contributions du Tableau 4.1 ont été générées en double. Une première fois avec la courbe de contraste type exponentielle définie dans l'équation (4.4a) et une seconde fois avec la courbe de contraste linéaire (4.4b). La Figure 4.4 et 4.5 ci-dessous illustrent les cibles résines attendues et les masques correspondants pour deux configurations du Tableau 4.1.

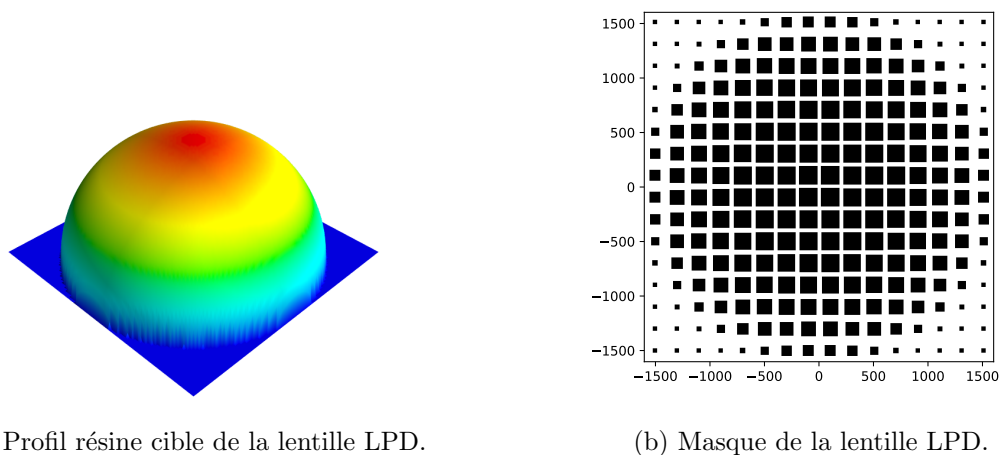
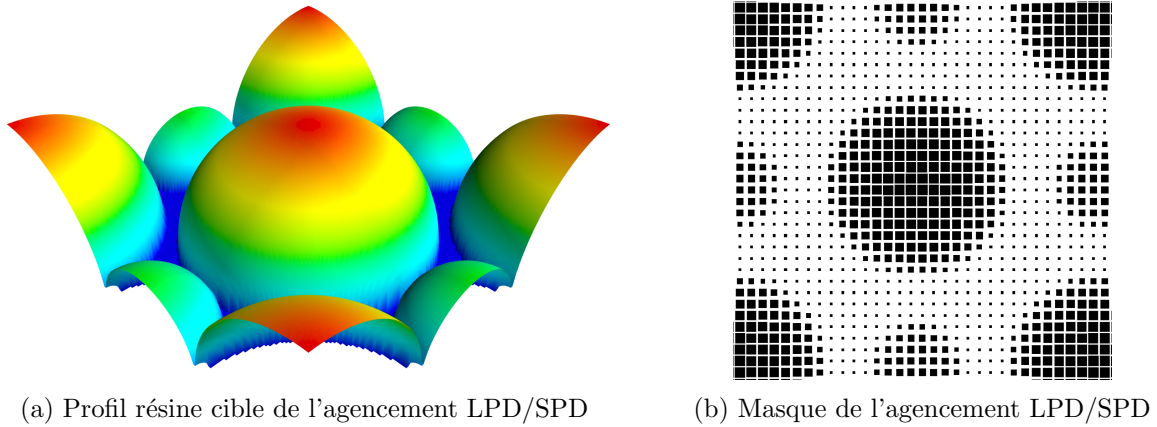


FIGURE 4.4 – Profil résine de la grande microlentille LPD son masque associé (courbe de contraste exponentielle (4.4a)).

3. La SPD n'a pas été intégrée en isolé car il était certain que la méthode de construction de masque ne pouvait aboutir à un résultat satisfaisant dans la résine.



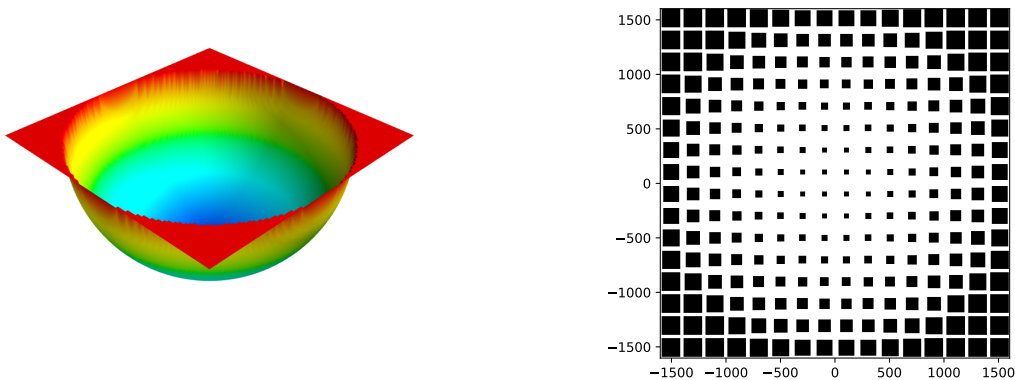
(a) Profil résine cible de l'agencement LPD/SPD

(b) Masque de l'agencement LPD/SPD

FIGURE 4.5 – Profil résine de la configuration SPD/LPD et son masque associé (courbe de contraste exponentielle (4.4a)).

4.2.2 Microlentille inversée

La microlentille inversée correspond à une extrusion hémisphérique de résine. Un seul masque est intégré sur FISH. Celui-ci est isolé, et correspond à l'inversion de la microlentille LPD. La courbe de contraste utilisée est linéaire.



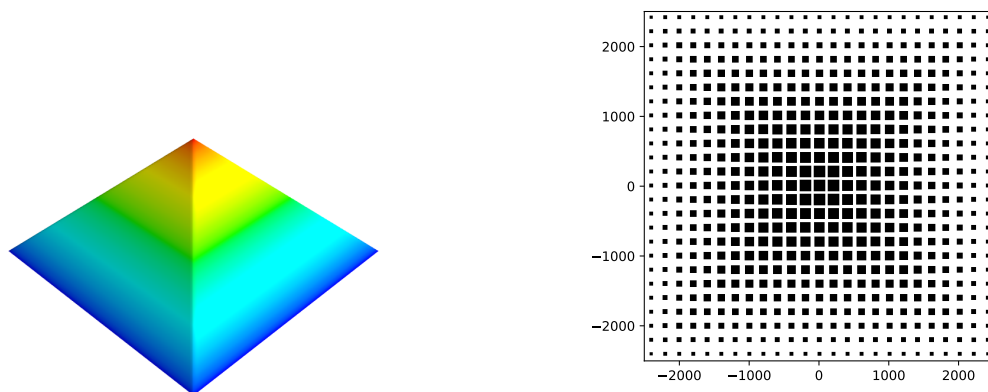
(a) Profil résine cible de la microlentille inversée.

(b) Masque de la microlentille inversée.

FIGURE 4.6 – Profil résine d'une microlentille inversée et son masque associé (courbe de contraste linéaire (4.4b)).

4.2.3 Pyramide

Une pyramide à base carrée a été intégrée sur FISH. La hauteur de la pyramide est de 1600nm, la base a pour côté 5 μ m. La seule pyramide intégrée sur FISH est isolée. La courbe de contraste linéaire a été utilisée pour sa réalisation.



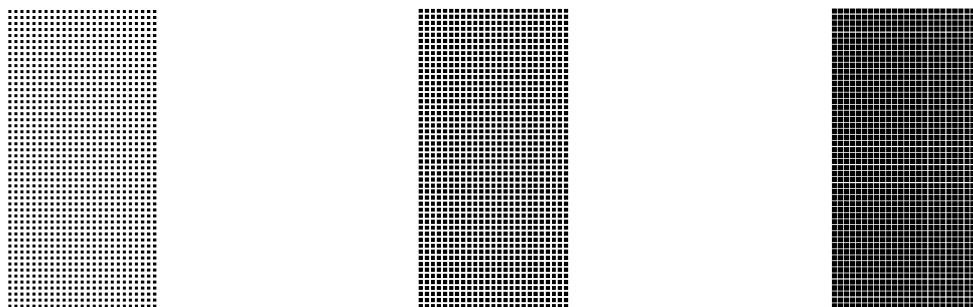
(a) Profil résine cible de la pyramide.

(b) Masque de la pyramide.

FIGURE 4.7 – Profil résine de la pyramide et son masque associé (courbe de contraste linéaire (4.4b)).

4.2.4 Piliers

Les piliers sont des zones de $5\mu\text{m}$ par $10\mu\text{m}$ où la densité de chrome est constante (la taille de tous les plots de chrome est la même). Chaque masque de pilier est donc constitué de 25 plots de chrome selon la direction x et de 50 plots de chrome dans la direction y . La Figure 4.8 ci-dessous illustre 3 masques de pilier à différentes densités de chrome.



(a) Masque d'un pilier à faible densité de chrome.

(b) Masque d'un pilier à densité de chrome moyenne.

(c) Masque d'un pilier à haute densité de chrome.

FIGURE 4.8 – Exemples de masques de piliers à faible 4.8a, moyenne 4.8b et haute 4.8c densité de chrome.

51 masques de piliers ont été intégrés sur FISH avec une densité croissante couvrant la gamme définie par la formule (4.2). Les masques de piliers sont disposés en ligne et séparés de $10\mu\text{m}$ centre à centre. Chaque pilier laisse passer plus ou moins de lumière en fonction de sa densité de chrome (cet aspect a déjà illustré sur la Figure 2.9 page 37). Cette zone de FISH a pour objectif de déterminer les courbes de contraste de la résine par mesure profilométrique, ce qui permettra de les comparer aux courbes de contraste théoriques utilisées pour créer FISH (4.4a).

4.3 Conditions de procédé : empilement, exposition et développement

Avant toute chose, il est important de préciser qu'un travail conséquent a été réalisé avant et durant la thèse par l'équipe procédé du CEA de manière à évaluer plusieurs résines candidates pour les applications grayscale. Un aperçu de ce travail de sélection est disponible dans l'article [Allouti et al., 2019]. Ce travail a permis d'identifier deux résines candidates notées A et B. Nous verrons qu'au cours de la thèse, la résine B s'est démarquée comme celle possédant les propriétés les plus avantageuses pour les applications grayscale. Cette section vise à décrire en détail les conditions de procédés utilisées pour la lithographie grayscale avec ces résines en commençant par l'empilement, les conditions d'exposition, puis par celles de développement.

• Empilement

Les empilements utilisés pour la résine A et la résine B sont schématisés sur la Figure 4.9 par ordre d'utilisation. Les étalements ont été réalisés dans un équipement TEL Lithius. L'empilement *type I* consiste à déposer la résine sur une couche planarisante. Cette couche, comme son nom l'indique, a pour rôle d'offrir une surface plane entre deux étapes de lithographie. Une couche de BARC est étalée entre le silicium et la couche planarisante de manière à supprimer les effets des ondes stationnaires dans la résine. Cet empilement a été utilisé en début de thèse de manière à caractériser la résine sans souffrir de la présence d'ondes stationnaires. L'empilement *type II* consiste à déposer la résine B sur une autre couche de résine B préalablement durcie par traitement thermique. L'empilement *type II* a été introduit en cours de thèse par STMicroelectronics pour les applications microlentilles imageurs⁴.

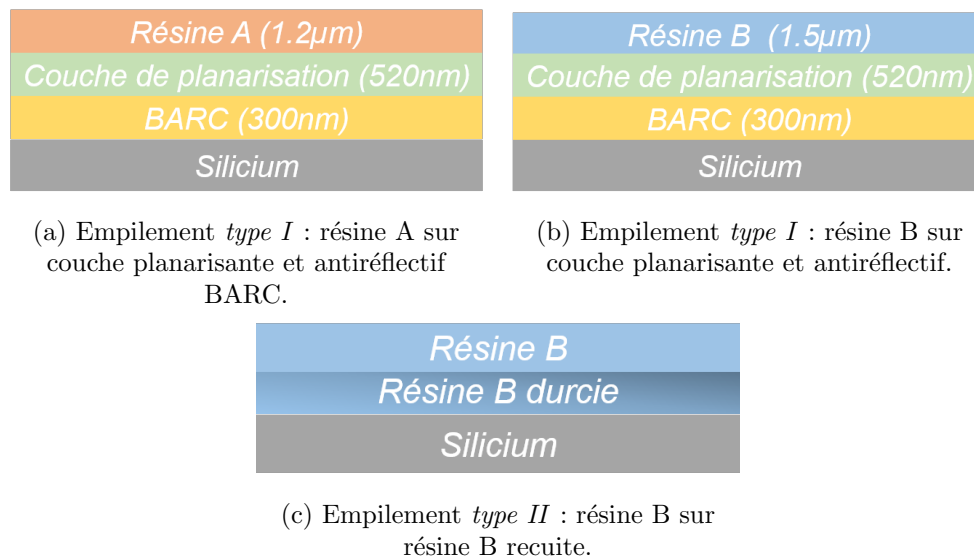


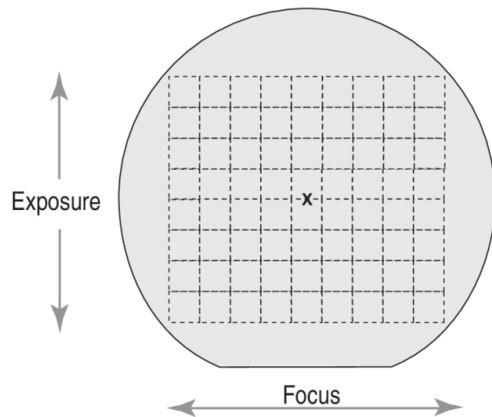
FIGURE 4.9 – Empilements utilisés pour la résine A et la résine B.

Au moment de réaliser FISH l'empilement n'était pas encore arrêté, en particulier l'épaisseur de résine à étaler. La hauteur de résine maximale des profils décrits jusqu'à présent est de 1600 nm. Cette hauteur est basée sur celle de la microlentille LPD. Or, comme nous l'avons vu précédemment la hauteur maximale de résine visée pour cette structure est en réalité de 1400 nm. Par conséquent, les pixellisations réalisés pour FISH ne sont pas adaptées à l'épaisseur de résine utilisée en pratique. Cet aspect n'est pas limitant puisque l'objectif de FISH est d'étudier la réponse des résines à l'illumination grayscale et de permettre sa modélisation.

4. Il n'est pas envisageable d'avoir une couche réfléchive entre la lentille et la photo-diode sur produit réel, car dans ce cas le signal lumineux serait stoppé.

• **Exposition**

L'exposition du masque a été réalisée dans un stepper Canon iZ+ dont les paramètres optiques ont été présentés précédemment dans le Tableau 3.1 (page 47). Afin d'explorer plusieurs valeurs de dose et de focus les expositions ont été réalisées en Focus Exposure Matrix (FEM), pour des doses comprises entre 900 et 2500J/m² et des valeurs de focus s'étalant de -800nm à 800nm. Le principe d'exposition de plaque FEM est schématisé sur la Figure 4.10 ci-dessous.



Chaque champ d'exposition sur la plaque correspond donc à un couple (dose, focus) différent. Ce type d'exposition est utilisé classiquement en lithographie dans la recherche d'une fenêtre de procédé. La fenêtre de procédé est définie par l'ensemble des couples (dose, focus) pour lesquels une métrique particulière est atteinte à $\pm 10\%$.

FIGURE 4.10 – Schéma de principe d'une exposition en FEM [Flack et al., 2002].

• **Développement**

Une fois l'exposition terminée la plaque est développée pendant 60s. Le développeur liquide utilisé est un Tetramethylammonium hydroxide (TMAH) concentré à 1.1%. Suite à cette étape, la plaque est conservée de manière à être mesurée sur les différents équipements de métrologie disponibles en salle blanche. Ces mesures font l'objet de la section suivante.

• **Durcissement de la forme**

Cette étape de procédé n'est pas considérée dans le cadre de la thèse. Elle est néanmoins une étape essentielle à l'intégration des microlentilles dans le cadre des applications imageurs. Le but de l'étape de durcissement est de figer le motif de résine après l'étape de développement en utilisant un flash UV ou un traitement thermique particulier. Cette étape peut engendrer des modifications de forme pour le profil résine. Le durcissement des résines A et B a été étudié dans l'article [Allouti et al., 2019]. Cet article souligne un meilleur comportement de la résine B au durcissement.

4.4 Descriptions des équipements de métrologie et des mesures

Une fois la plaque exposée et développée, plusieurs techniques de métrologie ont été mises en place de manière à mesurer les profils obtenus. Le point de départ de la campagne de métrologie est la mesure au profilomètre. Cet équipement permet de mesurer des zones étendues sur le wafer. La mesure au profilomètre a pour but d'obtenir la courbe de contraste expérimentale de la résine en scannant la ligne de piliers décrite précédemment.

Dans un second temps, l'imagerie SEM sera présentée. Cette technique permet une visualisation en niveaux de gris des motifs résines à partir des électrons secondaires émis par la surface lorsqu'elle est soumise à un bombardement électronique. Dans le cadre de la lithographie grayscale, cette technique permet un contrôle visuel des profils obtenus et une mesure de leur empreinte.

Enfin, la mesure par AFM où la surface est scannée par une pointe nanométrique sera présentée. Les mesures réalisées en AFM sont les plus précises et seront donc utilisées pour

réaliser la calibration du modèle de développement.

Le Tableau 4.2 ci-dessous regroupe les différentes étapes de métrologie réalisées sur les différentes résines et empilements présentés jusqu'à présent.

TABLE 4.2 – Étapes de métrologie réalisées sur les différents couples résine/empilement.

Résine	Empilement	CD-SEM	Profilomètre	AFM	SEM
Résine A	Type I	✓	✓	✓	✗
Résine B	Type I	✓	✓	✓	✗
Résine B	Type II	✗	✗	✓	✓

4.4.1 Métrologie - Profilomètre

Le profilomètre est une technique de métrologie mécanique cousine de l'AFM, qui permet la mesure de structures de plusieurs centaines de millimètres de long à l'aide d'une pointe diamant qui scanne la surface et retourne avec précision l'altitude mesurée à chaque point. La précision du profilomètre est contenue dans sa sensibilité verticale et non horizontale. Il existe également des profilomètres optiques.

Dans notre cas, un profilomètre HRP-260 du fabricant KLA Tencor a été utilisé pour mesurer la ligne de piliers afin d'établir la courbe de contraste expérimentale des deux résines pour les comparer aux courbes de contrastes théoriques ((4.4b) et (4.4a)) utilisées lors de la création de FISH.

Les Figures 4.11 et 4.12 ci-dessous illustrent plusieurs courbes de contraste mesurées sur la résine A et la résine B avec l'empilement *type I*. La sous-Figure de gauche permet d'apprécier l'impact de la dose sur la courbe de contraste pour un focus nul. La sous-Figure de droite illustre l'influence du focus sur la courbe de contraste à dose fixe. Chaque point des courbes correspond à une hauteur de pilier mesurée. Il est important de noter que les valeurs d'intensité lumineuse sur les Figures 4.12 et 4.11 ont été calculées à partir du modèle optique décrit dans le chapitre précédent et non pas en utilisant la formule (4.3) (page 77).

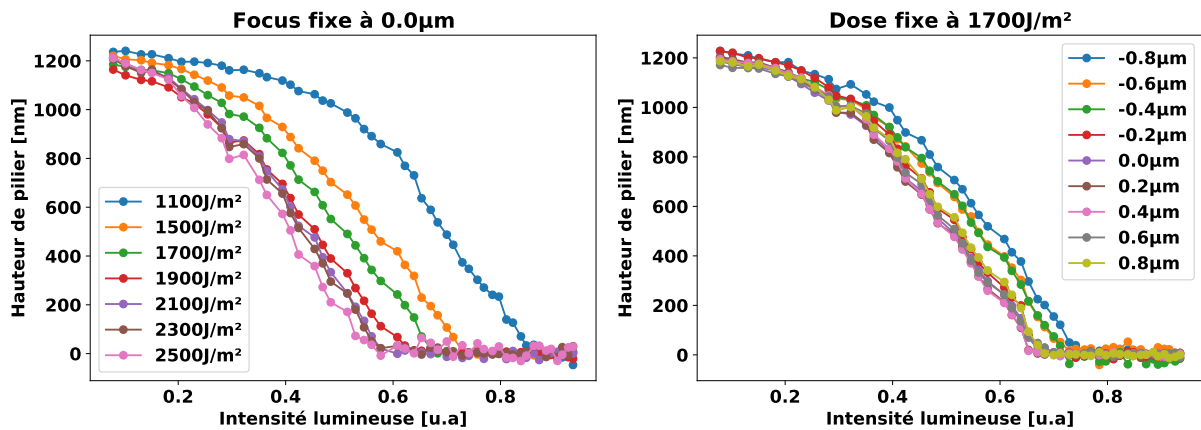


FIGURE 4.11 – Courbes de contraste expérimentales de la résine A sur empilement *type I* en fonction de la dose (gauche) et du focus (droite).

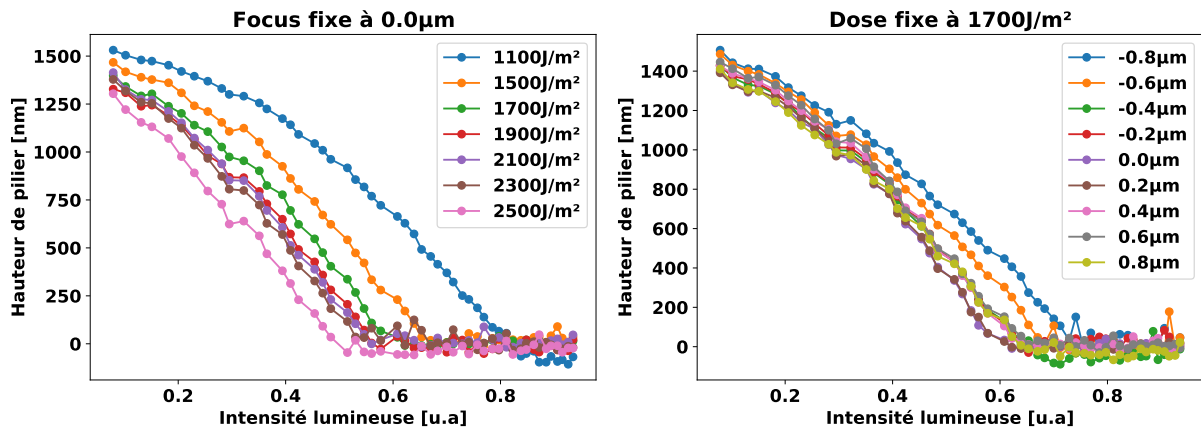


FIGURE 4.12 – Courbes de contraste expérimentales de la résine B sur empilement *type I* en fonction de la dose (gauche) et du focus (droite).

À faible intensité lumineuse les courbes de contraste présentent un plateau pour les deux résines. Ce plateau correspond à la hauteur maximale de résine (moins l'épaisseur retirée par *dark erosion*) : 1200nm pour la résine A et 1400nm pour la résine B. La résine ne reçoit pas suffisamment de lumière pour être retirée lors du développement. Lorsque l'intensité lumineuse augmente la hauteur de résine diminue jusqu'à être totalement inexistante, un second plateau est atteint. Plus la dose est élevée plus ce plateau est atteint rapidement. La gamme d'intensité lumineuse sur laquelle la hauteur de résine varie est appelée gamme d'intensité lumineuse utile.

Pour les deux résines c'est la dose qui influe le plus sur la gamme d'intensité lumineuse utile (et donc de densité de chrome utile). L'impact du focus semble du second ordre : les différences entre courbes de contraste pour différents focus sont faibles (la différence maximale est obtenue pour les defocus négatifs -800nm et -600nm ce qui signifie que l'image aérienne est en focus au dessus de la résine). Dans tous les cas, les courbes expérimentales obtenues ne présentent pas de caractère linéaire ou exponentiel comme supposé lors de la création du masque. Cependant, des deux résines, c'est la B qui présente le caractère le plus linéaire, ce qui est un avantage pour les applications grayscale⁵.

En revanche, la sensibilité à la dose est plus importante pour la résine B que pour la résine A. En effet, à très faible intensité lumineuse, on note que la hauteur maximale diminue avec la dose pour la résine B. Cet effet n'est pas présent sur la résine A.

5. Cette observation est la plus évidente sur les courbes de contraste à iso-dose.

Remarques sur les mesures au profilomètre

Les mesures au profilomètre n'ont pas été directes. Deux difficultés expérimentales ont rendu le traitement des données difficile :

- Le positionnement imparfait de la plaque dans l'équipement.
- Les difficultés de l'équipement à se repérer optiquement sur la plaque une fois cette dernière correctement positionnée. Les motifs de repérage n'étaient pas assez gros.

Au début, une seule ligne de scan était utilisée, mais très souvent la ligne de scan était décalée par rapport à la position réelle des piliers. Par conséquent, 5 lignes de scan ont été utilisées, chacune espacée de 5 μ m. Malgré cette précaution supplémentaire, certaines mesures demeurent inexploitable :

- Certaines lignes de scans sont vides : la pointe est beaucoup trop loin de la ligne à mesurer.
- Si la ligne de scan n'est pas parallèle à la ligne de piliers la pointe peut dériver et quitter la ligne de piliers, ce qui rend le scan inutilisable.

4.4.2 Métrologie - SEM

Deux types d'équipements SEM ont été utilisés : un Critical Dimension SEM (CD-SEM) VeritySEM 6i et un SEM d'observation FIB-SEM G3 tous deux du fabricant Applied Materials. Dans les deux cas, l'image est obtenue par l'intermédiaire d'un faisceau électronique qui scanne la surface de l'échantillon. Des capteurs récupèrent les électrons secondaires émis par la surface de manière à reconstruire sa topographie en niveaux de gris.

Le CD-SEM utilisé permet une automatisation des mesures et donc d'effectuer un très grand nombre de vérifications rapidement. Cependant, il permet seulement de visualiser les motifs en vue de dessus et pas sur le côté. C'est ce type d'appareil qui est utilisé dans les campagnes de vérification massive en microélectronique. Le SEM d'observation permet quant à lui une plus grande versatilité dans les prises de vue, notamment lorsque les aspects 3D sont importants. Cependant, il ne permet aucune mesure quantitative, seulement des prises de vue qualitatives (contrairement au CD-SEM la taille de la sonde du faisceau électronique n'est pas calibrée et suivie quotidiennement).

• CD-SEM

Les observations réalisées au CD-SEM ont permis d'analyser l'impact de la dose et du focus sur les profils résines obtenus en FEM. La Figure 4.13 ci-dessous illustre l'impact de la dose à focus nul sur la résine A et la résine B pour l'empilement *Type I* sur des motifs denses de microlentilles.

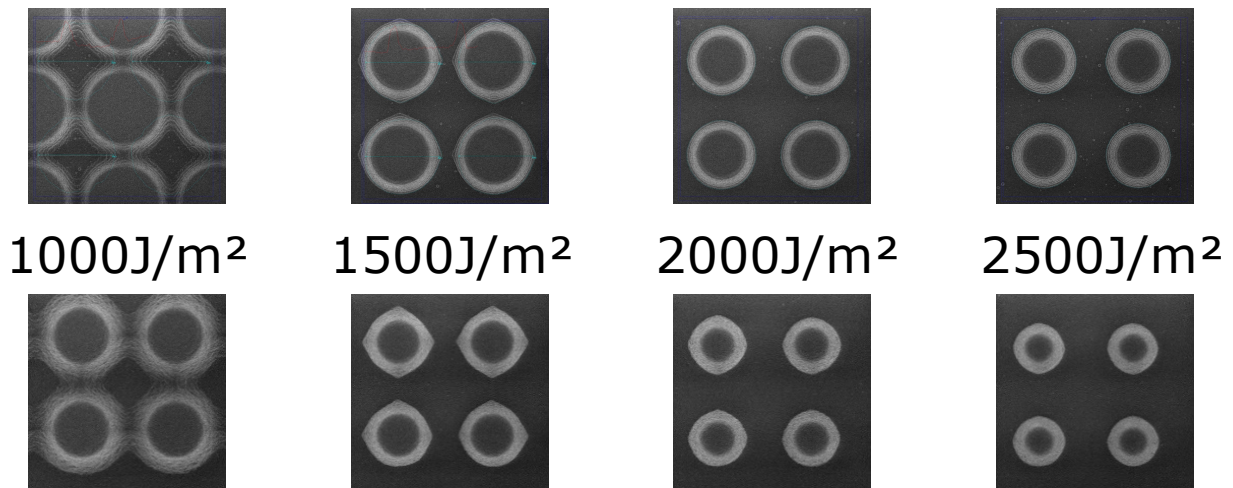


FIGURE 4.13 – Images CD-SEM de microlentilles denses à différentes doses pour la résine A (ligne supérieure) et la résine B (ligne inférieure) à focus nul sur empilement de *type I*. La taille de fenêtre est identique pour toutes les images.

On remarque que la résine A est horizontalement moins sensible à la dose que la résine B. En effet, le diamètre de la base des microlentilles diminue beaucoup plus rapidement avec la dose pour la résine B que la résine A. L'influence du focus est évaluée pour des valeurs entre -800 et +800nm. Les images sont illustrées sur la Figure 4.14 ci-dessous :

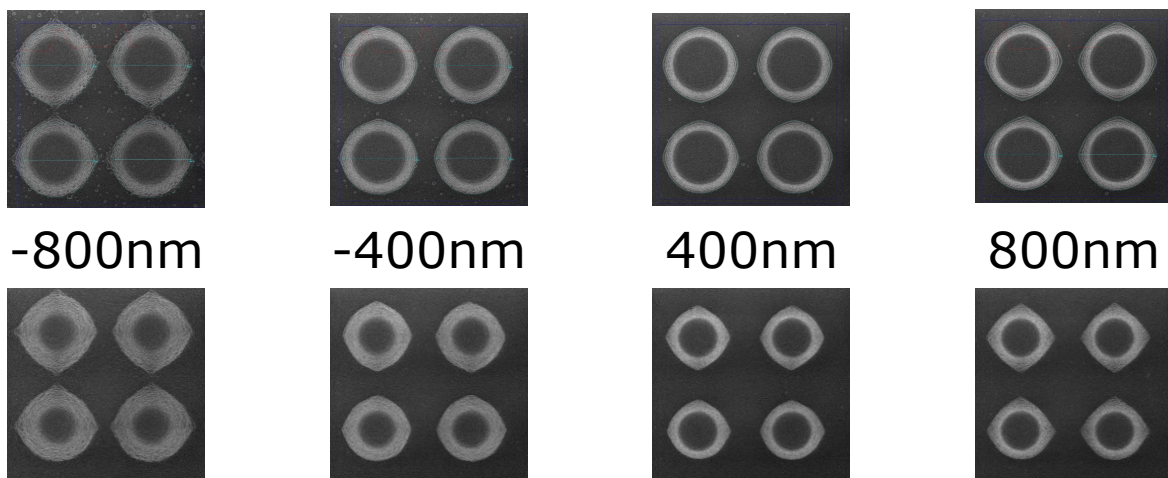


FIGURE 4.14 – Images CD-SEM de microlentilles denses à différentes valeurs de focus pour la résine A (ligne supérieure) et la résine B (ligne inférieure) à dose 1700J/m^2 sur empilement de *type I*. La taille de fenêtre est identique pour toutes les images.

La variation de focus présente un effet moins marqué sur la forme de la microlentille. On peut noter que les flancs sont affectés et deviennent plus clairs à focus négatif qu'à focus positif ou nul.

• **SEM d'observation**

La Figure 4.15 ci-dessous met en perspective des masques grayscale (ligne du haut) avec le résultat dans la résine B (ligne du bas) imagée avec un SEM d'observation⁶. L'empilement est de *Type II*.

6. Le SEM d'observation ne permet pas d'inclure d'échelles sur les images obtenues.

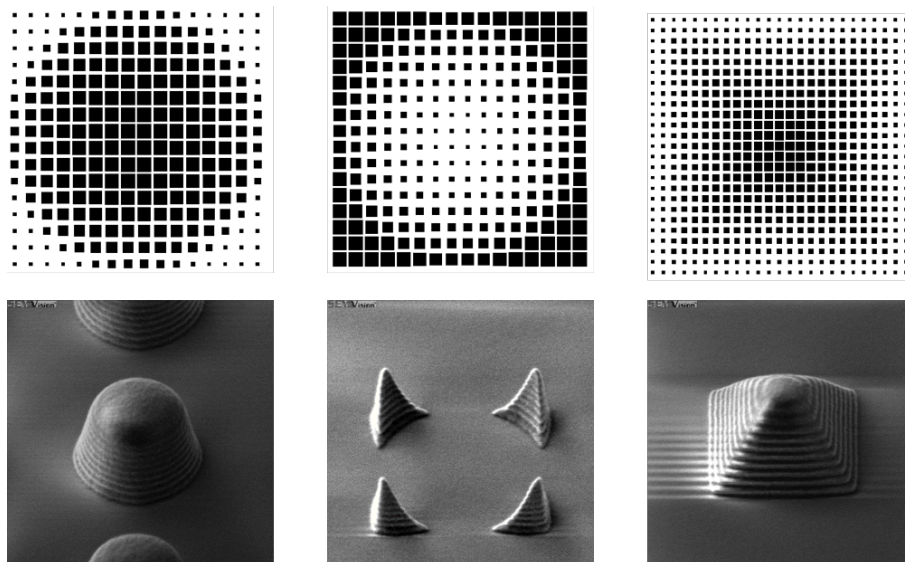


FIGURE 4.15 – Masques grayscale (ligne supérieure) et images SEM de la résine B avec empilement *Type II* à focus nul et à dose $1100\text{J}/\text{m}^2$. Les trainées blanches correspondent à des accumulations de charges électroniques combinées à des effets géométriques liés aux ondes stationnaires.

Ces profils permettent de mieux appréhender les images en vue de dessus obtenues en CD-SEM notamment sur les bords de motifs. Plus particulièrement, on remarque que les images de la Figure 4.15 ci-dessus présentent toutes des oscillations de surface, il s’agit d’ondes stationnaires déjà présentées dans la partie 1 et 3. La présence de ces ondes n’est pas un hasard puisque l’empilement de *Type II* ne contient pas de couche anti-réfléchive.

4.4.3 Métrologie - AFM

L’AFM est un dispositif de métrologie permettant une mesure opto-mécanique des surfaces à l’échelle nanométrique en 3D. Une pointe vibrante vient scanner la surface de l’échantillon à mesurer. La position et la fréquence de vibration de la pointe sont suivies en temps réel par l’intermédiaire d’un faisceau laser réfléchi au sommet de la pointe. Lorsque la topographie rencontrée évolue la déflexion du faisceau laser est mesurée par des capteurs optiques et convertie en différence d’altitude. L’AFM utilisé dans le cadre de cette thèse est un Insight3D du fabricant Bruker permettant la création de recettes automatisées à l’image du CD-SEM. En revanche le temps d’acquisition pour une mesure AFM est beaucoup plus importante qu’avec un CD-SEM. Le positionnement et la mesure prennent plusieurs minutes là où le CD-SEM prend moins d’une seconde.

L’avantage de l’AFM est la possibilité d’extraire les informations 3D d’une image, contrairement à l’imagerie SEM pour l’instant limitée à des visualisations 2D même si des techniques de reconstructions de profil 3D sont en développement [Valade et al., 2019]. Cette section sera donc l’occasion d’évaluer la qualité de la construction de FISH puisque les profils AFM pourront être comparés aux profils résines utilisés pour générer les pixellisations de FISH.

Notes sur les mesures AFM

Plusieurs éléments sont à considérer lors de l'exploitation des mesures AFM :

- Les mesures AFM présentent un arrière-plan parasite.
- Le positionnement de la zone de scan n'est jamais parfaitement centré sur le motif.
- Le nombre de lignes de scan peut être renseigné mais pas le nombre de points le long de chaque ligne. Le nombre de points le long d'une ligne est (beaucoup) plus grand que le nombre de lignes.

Afin d'exploiter correctement les mesures les étapes suivantes sont réalisées sur les profils scannés.

- Prise en compte et correction de l'arrière-plan. Un masque binaire est défini de manière à séparer le signal de l'arrière plan. Un polynôme de degré 2 est utilisé pour approximer l'arrière-plan et le retirer.
- Recentrement du motif de résine au centre de la fenêtre en utilisant le centre de gravité du motif.
- Interpolation du scan sur une sous-fenêtre correspondant à la taille du masque associé (l'interpolation assure le même nombre de points en x et en y : iso-échantillonnage).

Dans les pages suivantes, le traitement de scans AFM pour différents motifs est présenté.

• **Microlentille isolée**

La Figure 4.16 ci-dessous présente un scan AFM d'une microlentille isolée exposée à une dose de 1300J/m^2 à focus nul pour la résine B sur empilement de *type II*. Le positionnement du scan n'est pas parfait, la microlentille est décentrée par rapport à l'origine de la fenêtre (lignes rouges pointillées). Après une correction d'arrière plan le profil est recentré de manière à se trouver centré sur l'origine. La fenêtre jaune correspond à la dimension du masque de la microlentille : le profil de la microlentille est interpolé sur cette fenêtre.

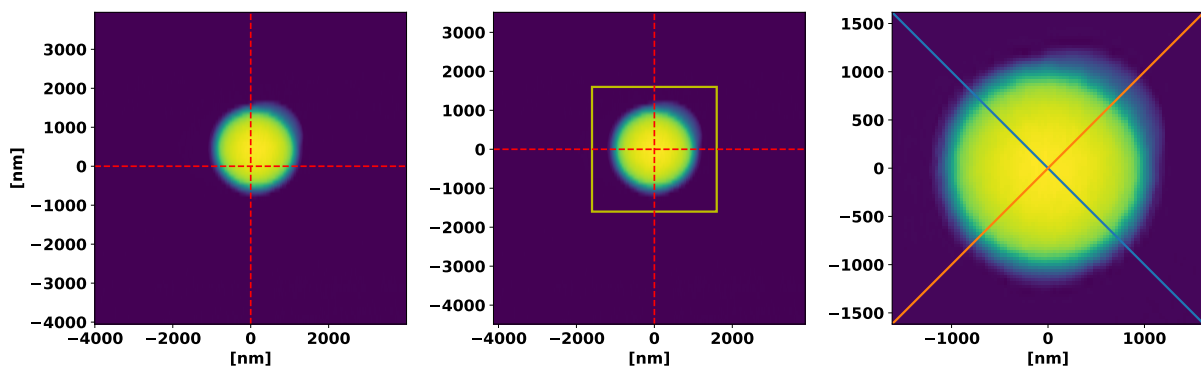


FIGURE 4.16 – Traitement d'un scan AFM de microlentille isolée : chargement du profil (gauche), recentrement du profil après correction de l'arrière plan (milieu) et interpolation du profil sur la fenêtre jaune.

On note que le profil AFM de la lentille n'est pas symétrique. Une «bavure» est visible dans le coin supérieur droit et de manière moins marquée en bas de la microlentille. Ces «bavures» ne sont pas réelles, elles sont le résultat d'un artefact lié à l'utilisation de l'AFM⁷. Cette observation est réalisable sur tous les profils scannés de microlentilles denses et isolés. Afin de mieux visualiser

7. Problème de déconvolution de l'effet de la pointe et/ou de vitesse de scan.

l'impact de cette protubérance, la Figure 4.17 ci-dessous illustre plusieurs coupes réalisées sur le motif interpolé. La cible résine est également visible en noir.

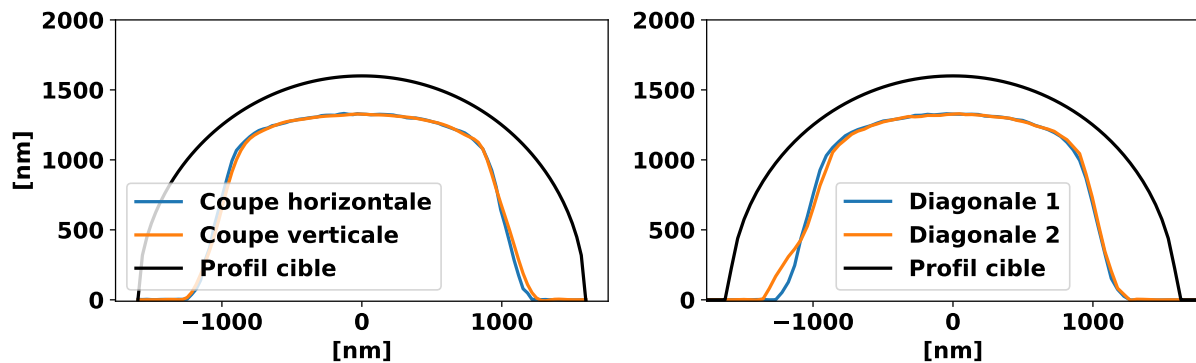


FIGURE 4.17 – Coupe horizontale, verticale et diagonales pour le motif de microlentille de la Figure 4.16. La bavure est visible sur la coupe diagonale 2.

La «bavure» est visible sur la courbe orange (diagonale 2). On remarque que les profils obtenus sont assez éloignés de celui attendu tant par la taille que par la forme : la forme obtenue retombe à zéro abruptement sans montrer de sphéricité. De plus le sommet est trop plat et pas assez haut.

• **Microlentille dense**

Le même principe est utilisé pour les microlentilles denses exposées à une dose de $1100\text{J}/\text{m}^2$ à focus nul comme illustré sur la Figure 4.18 :

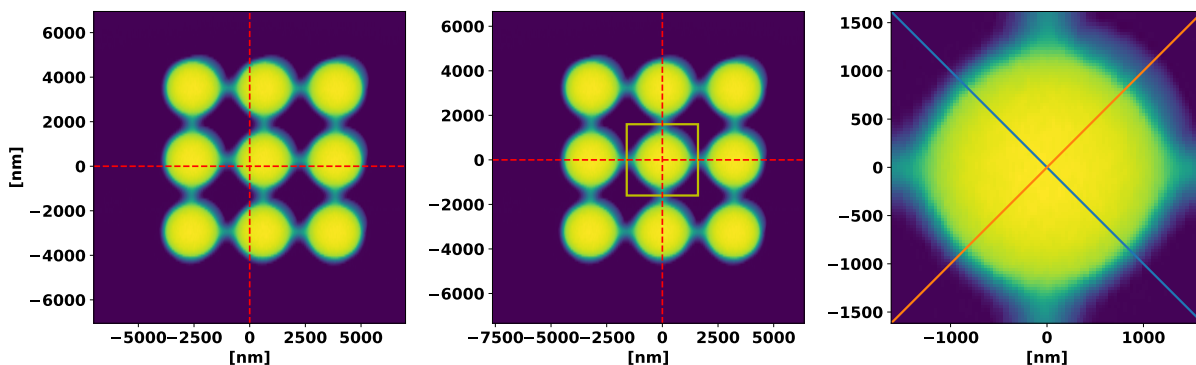


FIGURE 4.18 – Traitement d'un scan AFM de microlentille dense : chargement du profil (gauche), recentrement du profil après correction de l'arrière plan (milieu) et interpolation du profil sur la fenêtre jaune.)

Le recentrement est ici plus ardu car le nombre de microlentilles est plus important. On remarque également que la «bavure» est présente et peut impacter négativement l'opération. La Figure 4.19 ci-dessous illustre plusieurs coupes réalisées sur le motif interpolé. La cible résine est également visible en noir.

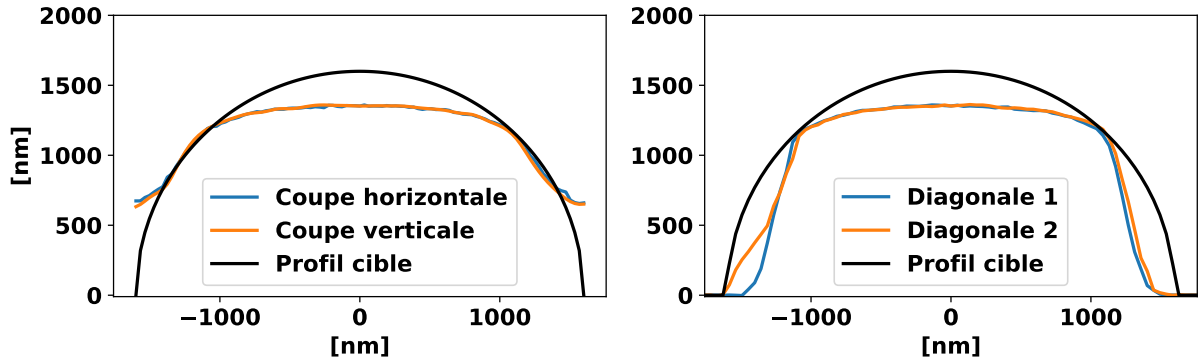


FIGURE 4.19 – Coupe horizontale, verticale et diagonales pour le motif de microlentille de la Figure 4.18. La bavure est visible sur la coupe diagonale 2.

La bavure est visible sur la même ligne de coupe. On notera également que le profil retombe à zéro uniquement dans les diagonales ce qui signifie que les microlentilles sont aboutées verticalement et horizontalement, comme on pouvait le pressentir sur les images de la Figure 4.18. Les effets de proximité sont importants.

• **Pyramide**

La Figure 4.20 présente le traitement d'un scan AFM d'une pyramide isolée exposée à une dose de 1300J/m^2 à focus nul. Contrairement aux microlentilles, aucun phénomène de «bavure» n'est visible sur les scans de pyramide.

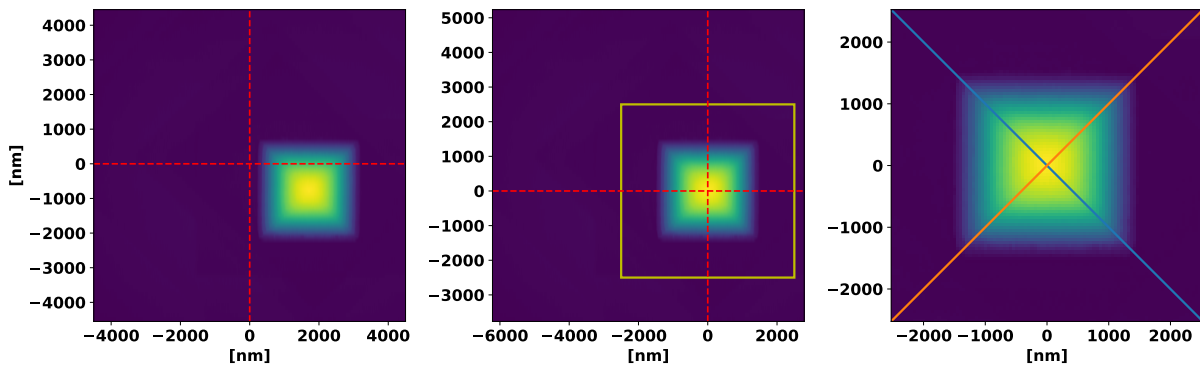


FIGURE 4.20 – Traitement d'un scan AFM de pyramide isolée : chargement du profil (gauche), recentrement du profil (milieu) et interpolation sur la fenêtre jaune correspondant au masque (droite).

Le recentrement est efficace pour ce motif. La Figure 4.21 ci-dessous illustre plusieurs coupes réalisées sur le motif interpolé. La cible résine est également visible en noir.

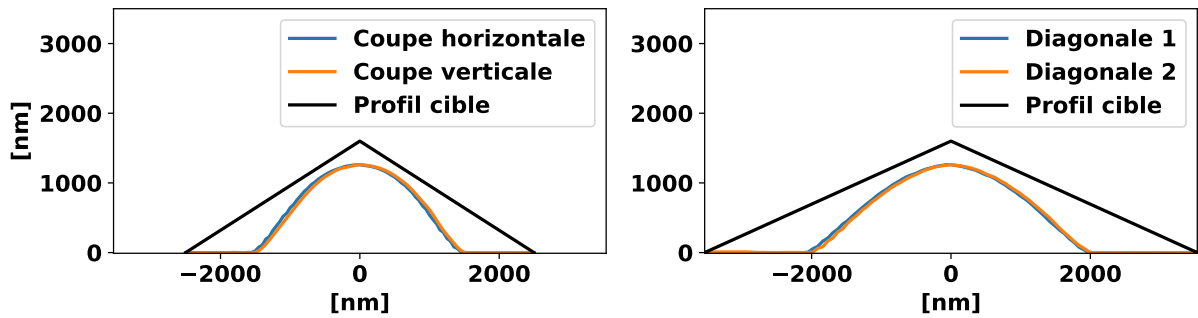


FIGURE 4.21 – Coupe horizontale, verticale et diagonales pour un motif de pyramide. Pas de phénomène de «bavure» visible, les profils sont bien symétriques.

Les profils obtenus sont à nouveau éloignés de ceux attendus.

• **Microlentille inversée**

La Figure 4.22 présente le traitement d'un scan AFM d'une microlentille inversée et isolée exposée à une dose de $1100\text{J}/\text{m}^2$ à focus nul.

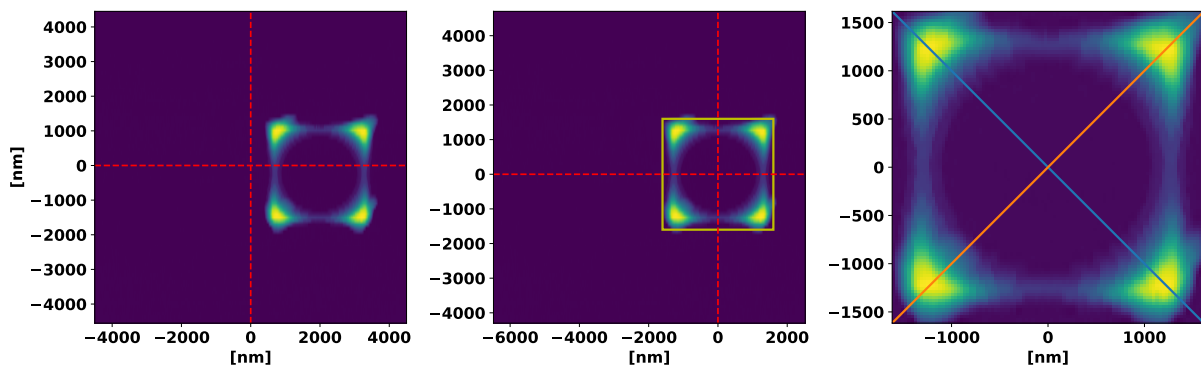


FIGURE 4.22 – Traitement d'un scan AFM de microlentille inversée isolée : chargement du profil (gauche), recentrage du profil (milieu) et interpolation sur la fenêtre jaune correspondant au masque (droite).

Le phénomène de «bavure» est également visible sur ce motif. La Figure 4.23 ci-dessous illustre plusieurs coupes réalisées sur le motif interpolé. La cible résine est également visible en noir.

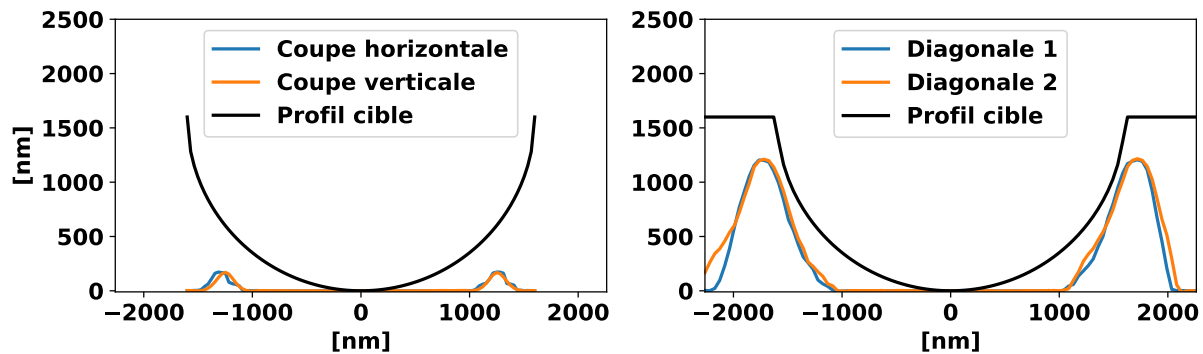


FIGURE 4.23 – Coupe horizontale, verticale et diagonales pour un motif de microlentille inversée. La «bavure» est visible sur la coupe diagonale 2 en orange.

Le profil expérimental est très éloigné de celui attendu. La nature isolée du motif peut expliquer les courbes obtenues. Avec une configuration dense les masques voisins auraient probablement évité à la résine de retomber à zéro dans les bords de domaine.

Les motifs présentés dans cette section ne sont qu'un aperçu de la totalité des mesures effectuées. Les profils ont été mesurés pour plusieurs doses et valeurs de focus.

4.5 Conclusion sur la métrologie, choix de la résine et de l'empilement

L'ensemble des mesures réalisées permet de dresser plusieurs conclusions. Tout d'abord, il est évident que les pixellisations grayscale ne permettent pas d'obtenir les formes attendues dans la résine. Cette observation n'est pas étonnante puisque FISH a été réalisé sans aucune connaissance de la résine. Il est donc nécessaire de développer un algorithme de création de masque plus élaboré que celui utilisé pour FISH.

Au terme de la prospection des résines, le choix s'est arrêté sur la résine B avec empilement de *type II* pour les raisons suivantes :

1. STMicroelectronics a souhaité que la thèse se concentre sur l'empilement de *type II* par soucis de facilité d'intégration. L'étude de l'empilement de *type I* a donc été abandonnée.
2. La résine B présente une sensibilité plus forte à la dose, mais une courbe de contraste plus linéaire que la résine A ce qui est préférable en grayscale.
3. La résine B dispose de meilleures propriétés de durcissement de forme [Allouti et al., 2019].
4. Le fabricant de la résine B était également plus ouvert d'un point de vue communication sur les paramètres de la résine.

La section suivante décrit le processus de calibration du modèle de développement à partir des mesures AFM réalisées sur la résine B avec l'empilement de *type II*.

4.6 Calibration du modèle de développement

Les paramètres de Dill A, B et C qui permettent la simulation de l'exposition sont fournis par le fabricant de résine. Ces paramètres sont intrinsèques à la résine, ils sont indépendants du procédé utilisé et peuvent être utilisés directement. Le fabricant fournit également les paramètres du modèle de développement (paramètres du modèle Mack à 4 paramètres) : r_{min} , r_{max} , m_{th} et n). Ces paramètres ne peuvent pas être utilisés directement car notre procédé de développement est différent. Il est donc nécessaire d'établir les valeurs de ces paramètres adaptées à notre procédé de développement.

Pour mener à bien cette tâche une calibration de modèle a été réalisée. Le procédé de calibration repose sur une optimisation numérique utilisant des profils résines réels obtenus après l'étape de développement et mesurés à l'AFM. Une fonction de coût a été définie, de manière à quantifier les différences entre les profil réels et les profils simulés. L'optimiseur explore l'ensemble des paramètres du modèle de développement de manière à minimiser la fonction de coût pour un ensemble de profils. Plus la valeur de la fonction de coût est élevée plus les différences sont importantes. À l'issue de la calibration, les paramètres minimisant le plus la fonction de coût seront retenus pour décrire l'étape de développement.

Bien évidemment un seul profil expérimental ne suffit pas pour calibrer le modèle de développement. Afin d'être suffisamment représentatif, deux groupes de profils ont été utilisés. Le premier groupe de calibration est constitué de 80 profils de microlentilles LPD pour des valeurs de focus comprises dans l'intervalle $[-400\text{nm}, -200\text{nm}, 0\text{nm}, 200\text{nm}, 400\text{nm}]$ et de dose dans l'intervalle $[1100\text{J/m}^2, 1300\text{J/m}^2, 1500\text{J/m}^2, 1700\text{J/m}^2]$. Les microlentilles peuvent être isolées ou denses et correspondent aux deux courbes de contraste (exponentielle et linéaire). Le second groupe est constitué d'une plus grande variété de motifs : microlentilles LPD, pyramides et microlentilles inversées mais seulement à focus nul pour les mêmes valeurs de dose que le groupe 1. Le groupe 2 représente 23 profils. Une calibration sera réalisée sur chacun de ces deux groupes.

4.6.1 Fonction de coût

La calibration du modèle résine repose sur une optimisation numérique. Cette dernière nécessite la définition d'une fonction de coût. Le rôle de cette fonction est d'indiquer à l'optimiseur numérique la qualité de l'optimisation à un instant donné lors de l'exploration des paramètres. La qualité de l'optimisation est directement reliée aux différences entre le profil expérimental et le profil simulé. L'optimiseur cherche par descente de gradient à réduire la fonction de coût. Par conséquent, cette dernière doit être choisie de manière à être nulle lorsque le profil expérimental et le profil simulé sont égaux.

Nous avons vu dans la section 4.4.3 que les profils AFM présentent des «bavures» dans la diagonale. Par conséquent, il n'est pas possible d'utiliser une fonction de coût en 2 dimensions qui prendrait en compte la totalité du profil mesuré pour le comparer au profil simulé. Le choix a donc été fait d'utiliser une fonction de coût 1D se basant sur le profil horizontal évalué en $y = 0$. Ce profil correspond à la coupe horizontale sur les Figures 4.17, 4.19, 4.21 et 4.22. Lors de l'optimisation, à chaque nouveau jeu de paramètres exploré, la fonction de coût sera évaluée sur N_{profils} (80 ou 23 selon le groupe de calibration). En notant $y_{\text{AFM},n,i}$ le profil horizontal du n -ième motif à la position i et $y_{\text{simu},n,i}$ le profil simulé du n -ième motif à la position i , le coût est donné par l'équation :

$$\text{coût} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N_{\text{profils}}} \sum_{i=1}^k (y_{\text{AFM},n,i} - y_{\text{simu},n,i})^2} \quad (4.5)$$

La fonction de coût revient donc à calculer la norme L_2 pour tous les profils et à sommer l'ensemble des points avant de prendre la racine. L'optimiseur va donc chercher à optimiser les

paramètres du modèle de développement de manière à réduire la différence entre le profil mesuré et simulé pour la totalité des profils présents dans le groupe de calibration.

4.6.2 Description de l'optimiseur

L'optimiseur numérique utilisé est la fonction *minimize* de la librairie *optimize* du module Python Scipy [Scipy, 2020b]. Cette librairie propose plusieurs fonctions permettant d'optimiser localement des problèmes à une ou plusieurs variables. Dans notre cas, le problème est une optimisation scalaire à 4 variables. La fonction *minimize* permet ce type d'optimisation et propose plusieurs stratégies.

Il est nécessaire de pouvoir appliquer des limites aux valeurs optimisées, de manière à ne pas converger vers des paramètres non physiques. La méthode SLSQP à descente de gradient permet d'imposer des bornes aux paramètres optimisés (*bounds*). C'est cette dernière qui a été retenue.

Les paramètres fournis par le fabricant sont utilisés comme point de départ de l'optimisation. Ces paramètres correspondent au modèle de développement Mack à 4 paramètres (3.37) (page 70) ils sont indiqués dans le Tableau 4.3 ci-dessous :

TABLE 4.3 – Paramètres du modèle de développement fournisseur utilisés comme point de départ de la calibration.

m_{th}	r_{min} [nm/s]	r_{max} [nm/s]	n
0.022	0.8	81	2.78

Pour chaque paramètre, les bornes minimales et maximales sont fixées respectivement à 0.1 et 10 fois la valeur de départ. L'optimisation s'arrête lorsque la solution optimale est obtenue ou que l'un des critères d'arrêt de la fonction *minimize* est atteint. Le nombre d'itérations maximum est fixé à 100.

4.6.3 Résultats de la calibration

Dans cette section, les résultats de la calibration du modèle de développement pour les deux groupes de profils sont présentés. La qualité de la calibration sera présentée sous forme visuelle à travers la valeur de la norme L_2 évaluée entre le profil expérimental et le profil simulé le long de l'axe horizontal. Plus la valeur de la norme L_2 est élevée, plus la différence entre le profil expérimental et simulé est importante.

Groupe 1

La calibration du modèle de développement utilisant les profils du groupe 1 converge vers les valeurs du Tableau 4.4 ci-dessous :

TABLE 4.4 – Résultats de la calibration du modèle de développement pour les profils du groupe 1.

m_{th}	r_{min} [nm/s]	r_{max} [nm/s]	n
0.0022	2.37	47.48	2.79

Les Figures 4.25, 4.26, 4.27 et 4.28 illustrent l'apport de la calibration sur la fidélité de description des motifs du groupe 1 par le modèle résine pour plusieurs doses et à focus nul. Les résultats sont présentés sous forme de boîte à moustaches pour la norme L_2 évaluée le long du

profil horizontal. Les boîtes rouges correspondent au modèle non calibré, les vertes au modèle calibré. La Figure 4.24 ci-dessous rappelle la nomenclature associée à la visualisation sous forme de boîte à moustaches.



FIGURE 4.24 – Grandeurs associées à une boîte à moustaches pour la représentation d’une distribution : valeur minimale (Min), premier quartile (Q1), médiane (M), troisième quartile (Q3) et valeur maximale (Max).

Les profils sont regroupés deux à deux verticalement pour faciliter la lecture qui se réalise de haut en bas. Le terme «iso» signifie motif isolé alors que le terme «mat» désigne les motifs denses. Le terme *lin* fait à la courbe de contraste linéaire (4.4b) (page 77) et *exp* à la courbe de contraste exponentielle (4.4a) (page 77).

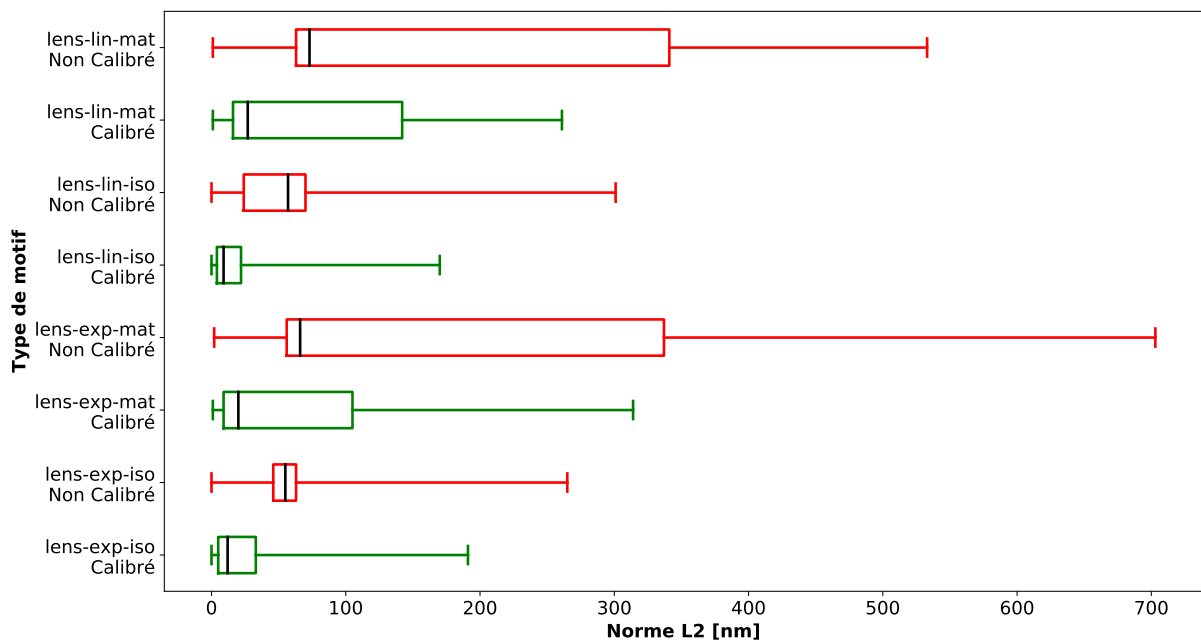


FIGURE 4.25 – Boîtes à moustaches des normes L_2 des profils du groupe 2 avant et après calibration (dose = 1100J/m² et focus nul).

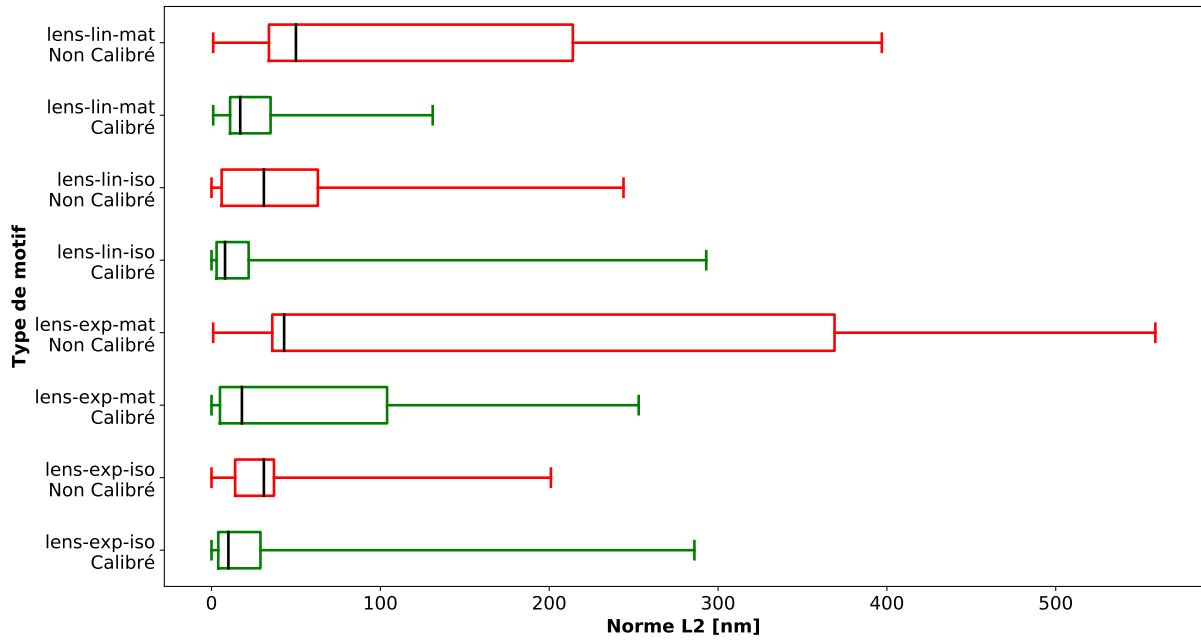


FIGURE 4.26 – Boîtes à moustaches des normes L_2 des profils du groupe 2 avant et après calibration (dose = 1300J/m² et focus nul).

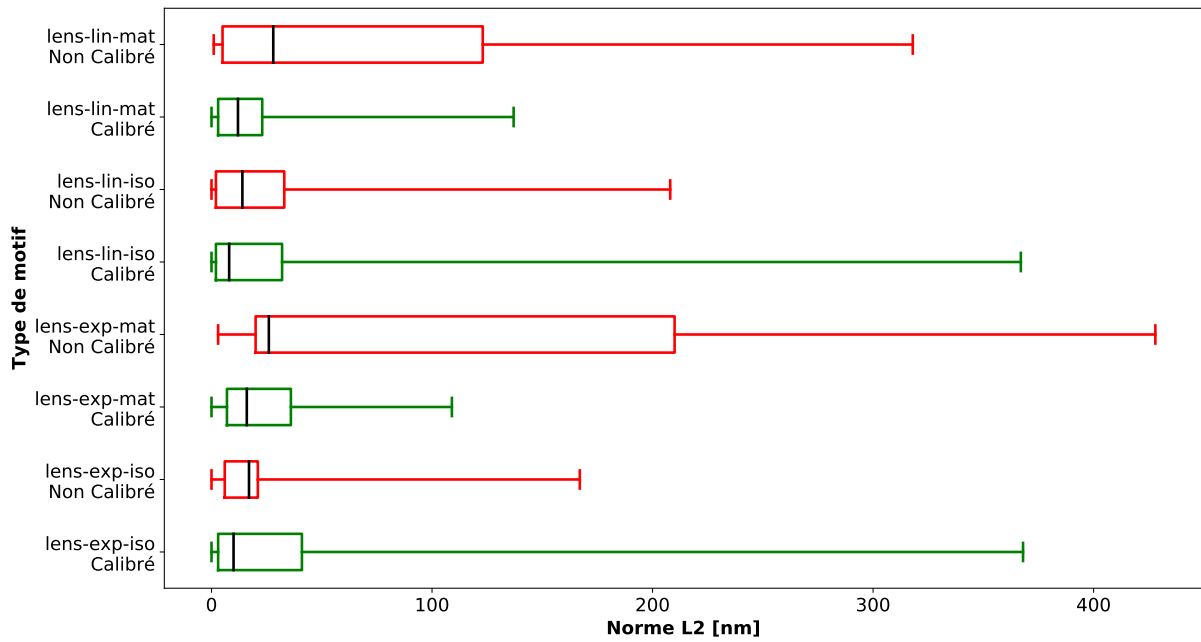


FIGURE 4.27 – Boîtes à moustaches des normes L_2 des profils du groupe 2 avant et après calibration (dose = 1500J/m² et focus nul).

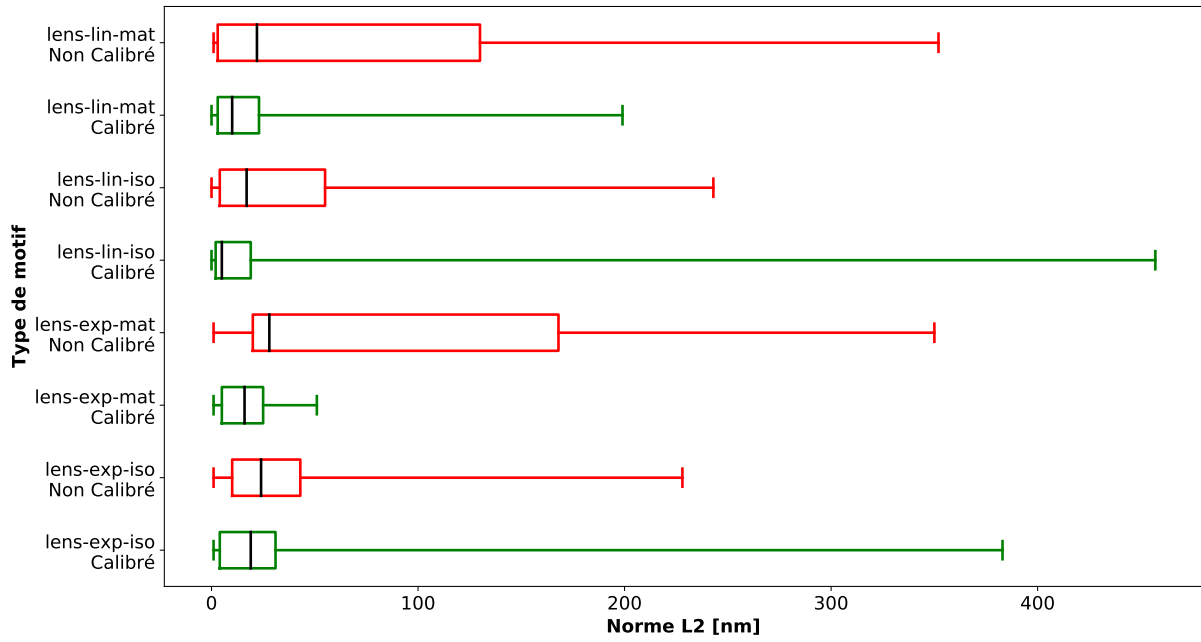


FIGURE 4.28 – Boîtes à moustaches des normes L_2 des profils du groupe 2 avant et après calibration (dose = $1700\text{J}/\text{m}^2$ et focus nul).

La calibration du modèle de développement améliore systématiquement la position de la médiane. Les améliorations les plus marquées concernent les profils denses. On remarque que le troisième quartile est presque toujours réduit (sauf pour un cas : la microlentille exponentielle en isolée à $1500\text{J}/\text{m}^2$), la position du maximum est parfois plus élevée après calibration.

Groupe 2

La calibration du modèle de développement utilisant les profils du groupe 2 converge vers les valeurs du Tableau 4.5 ci-dessous :

TABLE 4.5 – Résultats de la calibration du modèle de développement pour le groupe 2.

m_{th}	r_{min} [nm/s]	r_{max} [nm/s]	n
0.0022	3.03	51.03	3.11

Les Figures 4.29, 4.30, 4.31 et 4.32 sont similaires à celles présentées précédemment. Les motifs de pyramide et de microlentille inversée (=cuvette) sont rajoutés.

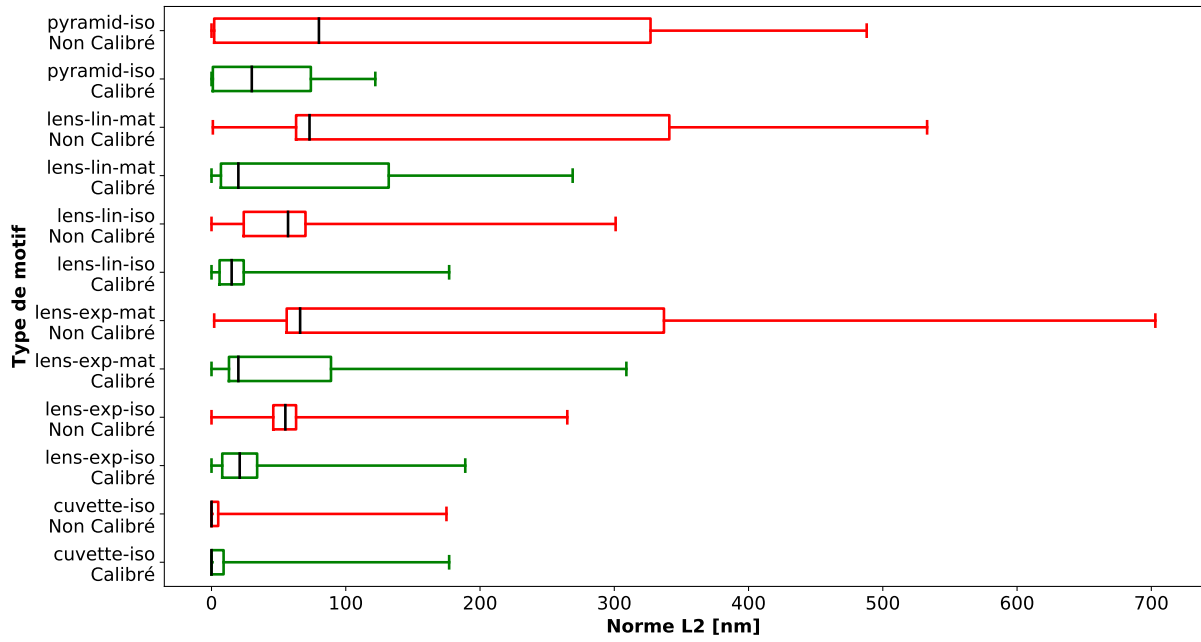


FIGURE 4.29 – Boîtes à moustaches des normes L_2 du profil horizontal pour des motifs simulés avec le modèle non calibré (rouge) et le modèle calibré (vert) pour une dose de $1100\text{J}/\text{m}^2$.

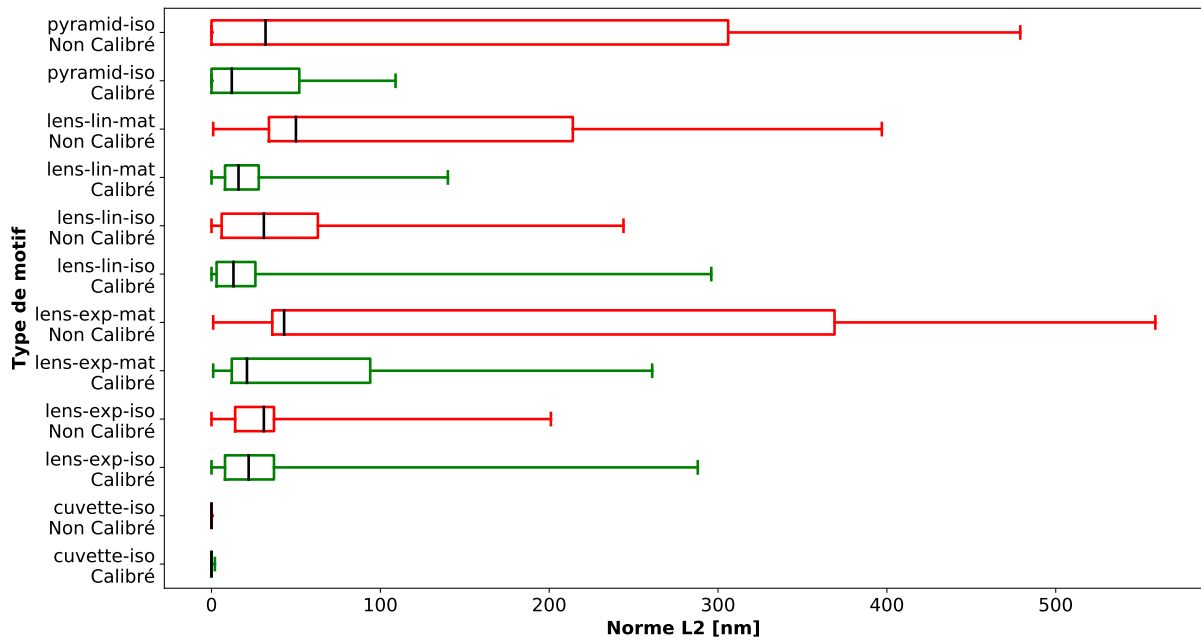


FIGURE 4.30 – Boîtes à moustaches des normes L_2 du profil horizontal pour des motifs simulés avec le modèle non calibré (rouge) et le modèle calibré (vert) pour une dose de $1300\text{J}/\text{m}^2$.

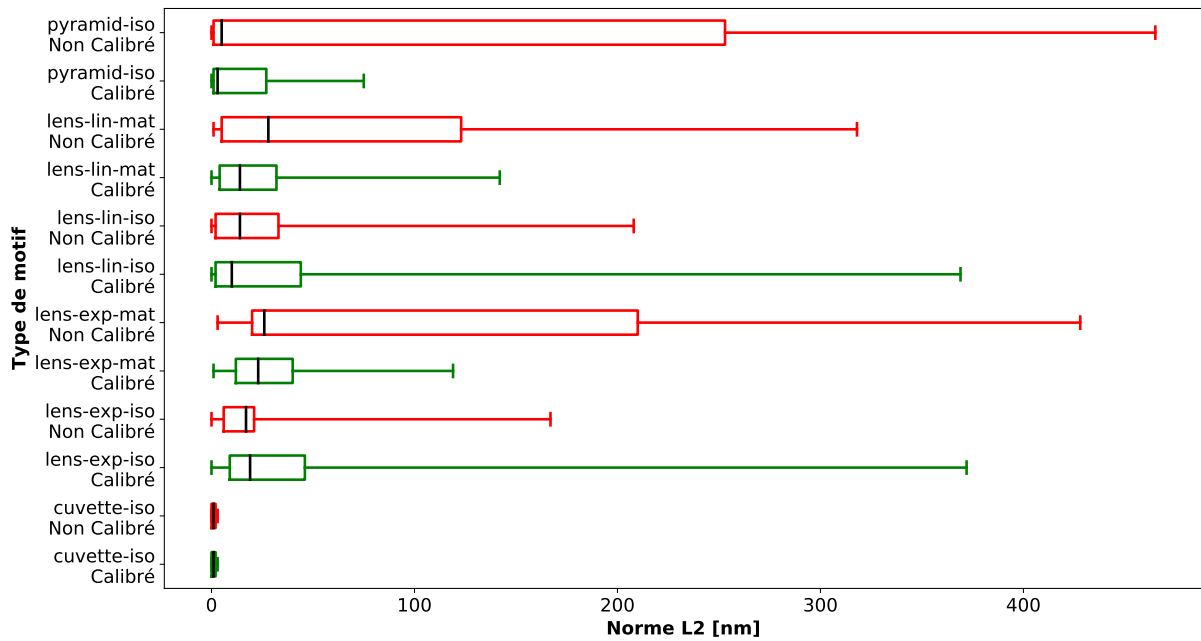


FIGURE 4.31 – Boîtes à moustaches des normes L_2 du profil horizontal pour des motifs simulés avec le modèle non calibré (rouge) et le modèle calibré (vert) pour une dose de $1500\text{J}/\text{m}^2$

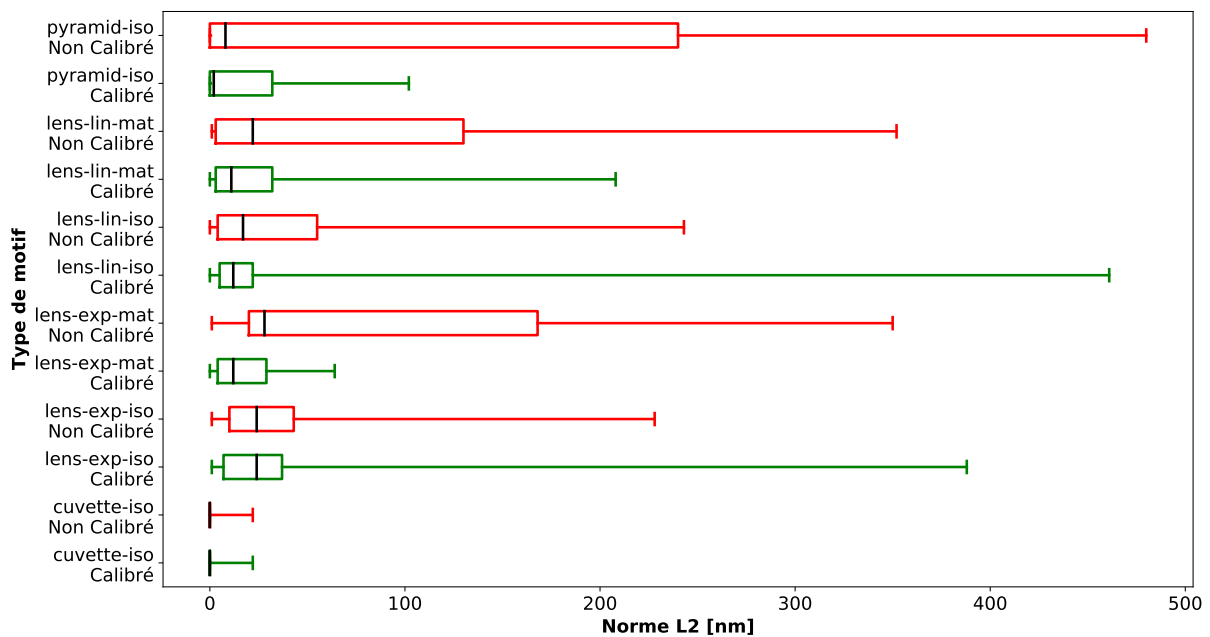


FIGURE 4.32 – Boîtes à moustaches des normes L_2 du profil horizontal pour des motifs simulés avec le modèle non calibré (rouge) et le modèle calibré (vert) pour une dose de $1700\text{J}/\text{m}^2$.

La calibration du modèle de développement permet une nette amélioration de la position de la médiane ainsi que des quartiles pour de nombreux profils, exception faite des profils de cuvette. Ces profils ne comportent que très peu de résine (comme le laisse présager la Figure 4.23), ainsi la médiane et les quartiles sont très proches de zéro. Il aurait été plus judicieux de calculer le coût le long de la diagonale pour ces profils afin de disposer de plus de «signal» utile.

Pour les deux groupes de calibration, on note que l'optimisation converge vers la valeur

minimale pour le paramètre m_{th} . Les différentes valeurs que peut prendre ce paramètre au cours de l'optimisation n'impactent que peu le profil résine obtenu. La Figure 4.33 ci-dessous illustre pour deux motifs de microlentille les profils obtenus pour les valeurs minimales et maximales de m_{th} ainsi que celles de départ. Les autres paramètres du modèle de développement sont fixés à la valeur fabricant.

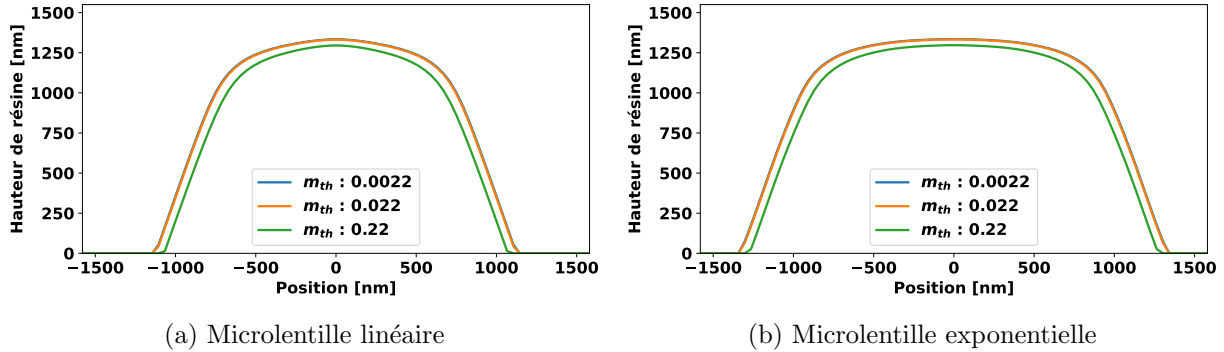


FIGURE 4.33 – Impact du paramètre m_{th} sur la description des motifs de microlentille en pixellisations linéaire et exponentielle.

À titre de comparaison la même étude est réalisée pour les trois autres paramètres r_{min} , r_{max} et n sur la Figure 4.34 ci-dessous :

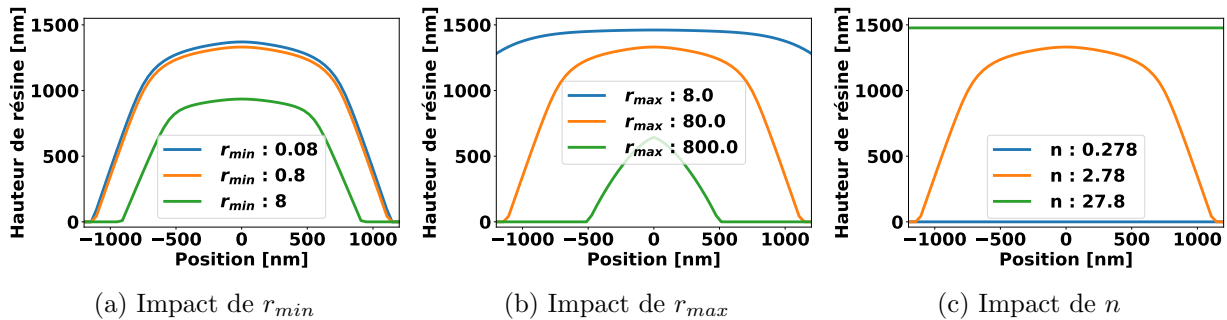


FIGURE 4.34 – Impact des paramètres r_{min} , r_{max} et n sur la description du motif de microlentille linéaire.

Les paramètres r_{min} , r_{max} et n ont donc beaucoup plus d'impact sur la description des profils des groupes de calibration que m_{th} . Une nouvelle calibration a été réalisée en fin de thèse permettant au paramètre m_{th} de couvrir la plage complète entre 0 et 1. Cette dernière aboutit au même résultat : l'optimiseur converge vers une valeur de m_{th} nulle. Il serait peut être pertinent de retirer ce paramètre des potentielles calibrations futures et de le fixer à 0. Attention cependant : il n'est pas exclu que ce paramètre joue un rôle plus important si le modèle résine prenait en compte le defocus de l'image aérienne et les ondes stationnaires.

4.6.4 Visualisation des profils calibrés

Cette section présente les résultats du modèle pour les deux jeux de paramètres obtenus par calibration. Les profils obtenus sont comparés au modèle non calibré (fournisseur) et au profil expérimental. La coupe horizontale et une coupe diagonale sont présentées pour chaque profil. La Figure 4.35 présente correspond aux motifs de microlentilles denses (courbes de contraste linéaire et exponentielle) pour deux valeurs de doses (1100J/m^2 et 1700J/m^2), à focus nul. Par soucis de visibilité, les prochaines pages seront présentées en format paysage.

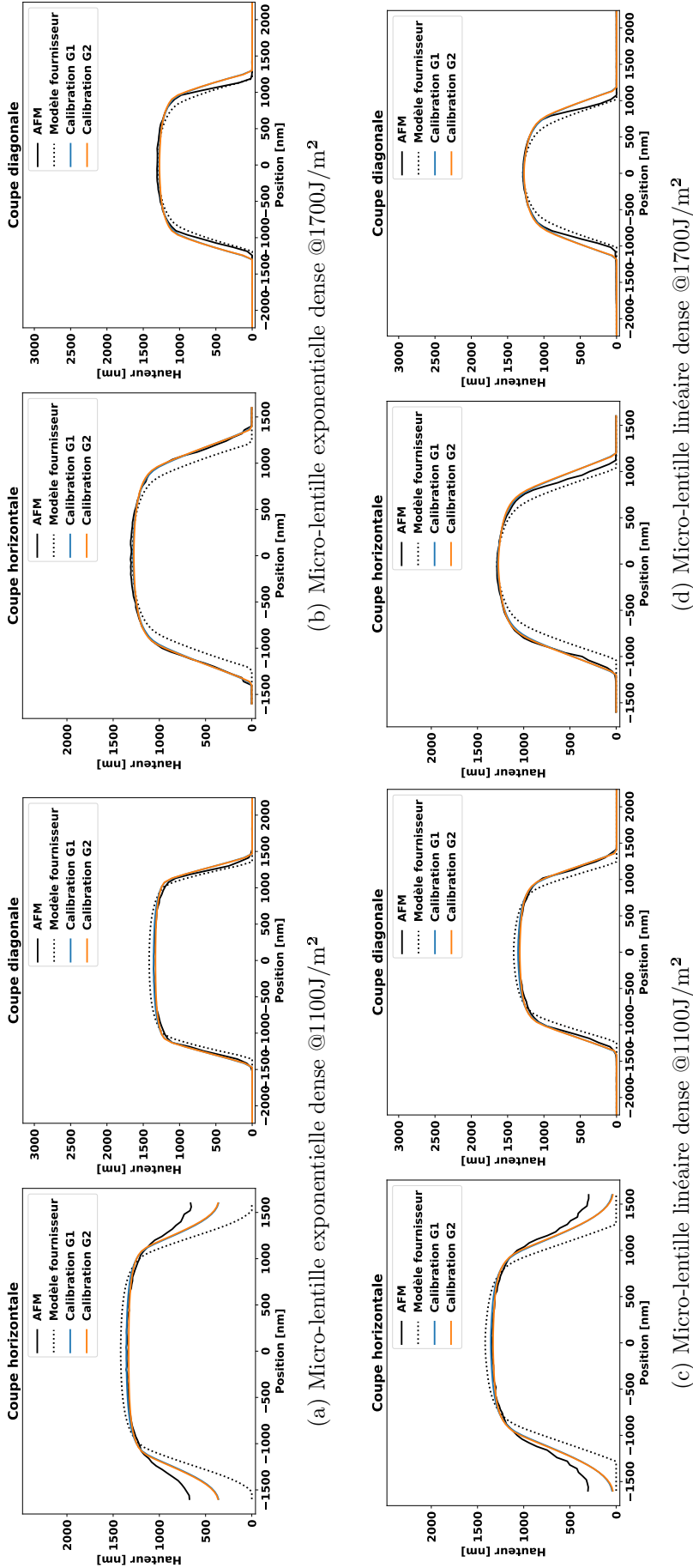


FIGURE 4.35 – Comparaison des modèles résines pour des motifs de microlentilles denses.

- Les modèles calibrés sont très proches entre groupe 1 et 2.
- À faible dose faible, les profils horizontaux sont les moins bien décrits. Les microlentilles se «touchent» avec les voisines dans cette direction ce qui n'est pas anticipé par le modèle.
- La description des profils dans la diagonale est bonne même si l'aspect creusé sur les pentes n'est pas toujours capté.

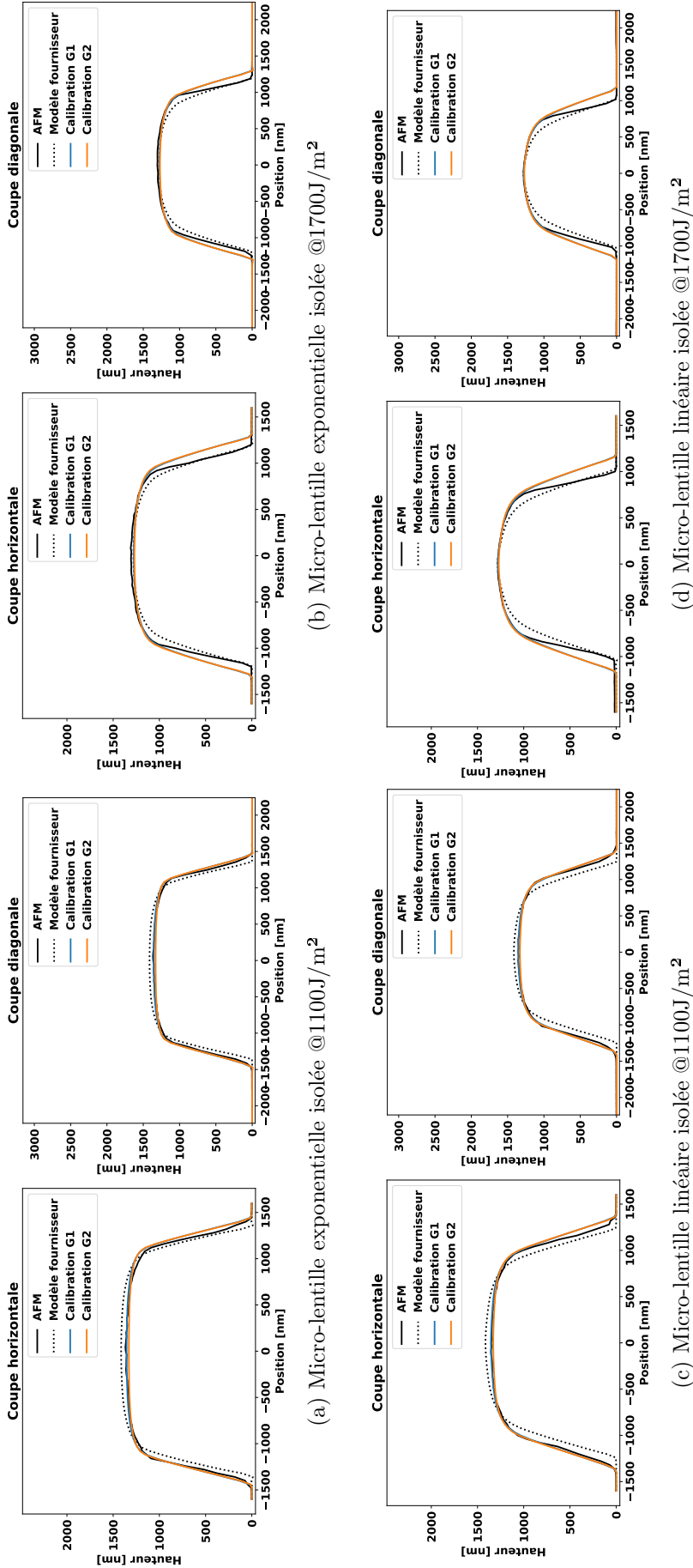
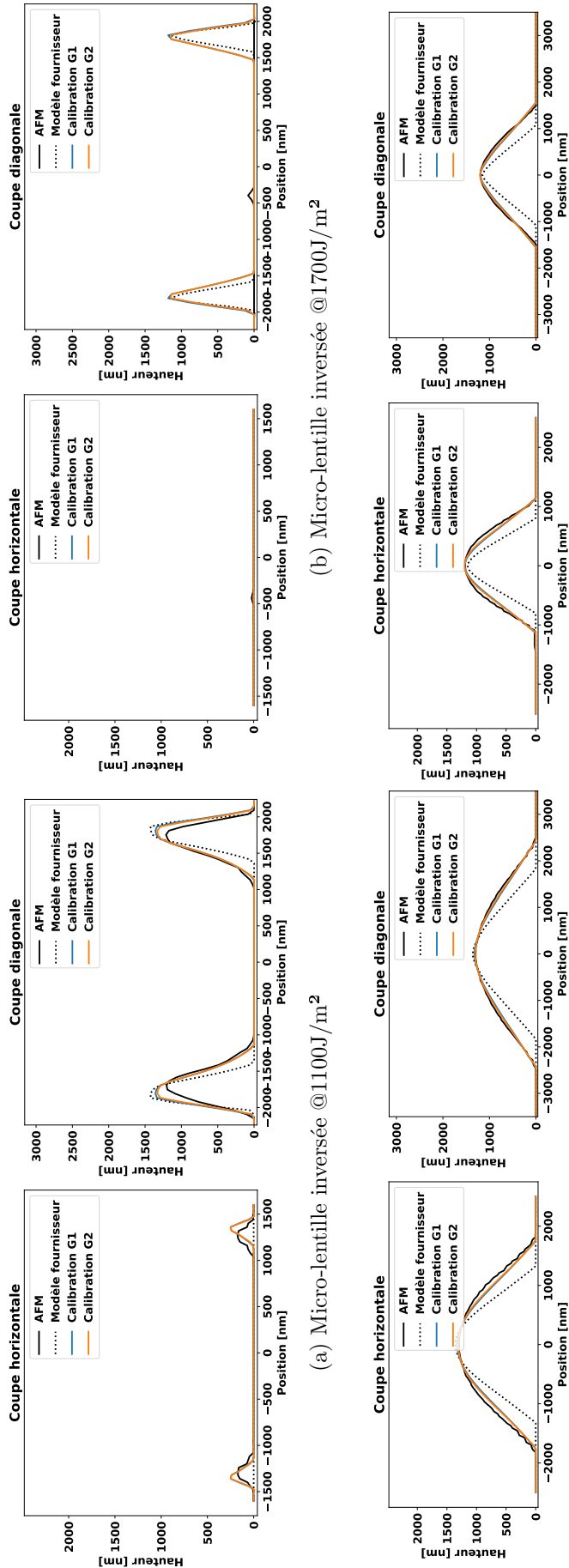


FIGURE 4.36 – Comparaison des modèles résines pour des motifs de microlentilles isolées.

- Les modèles calibrés sont à nouveaux très proches entre groupe 1 et 2.
- Les profils horizontaux sont très bien décrits, les motifs étant isolés il ne souffrent pas de l'influence des voisins.
- La description des profils dans la diagonale est bonne même si l'aspect creusé sur les pentes n'est pas toujours capté.


 (c) Pyramide isolée @1100J/m²

 (d) Pyramide isolée @1700J/m²

FIGURE 4.37 – Comparaison des modèles résines pour des motifs de micro-lentilles inversées et de pyramides.

- Les modèles calibrés sont très proches des profils expérimentaux sauf dans un cas.
- À 1700J/m², il n'y a plus de résine pour le motif de micro-lentille inversée alors que le modèle prévoit malgré tout la présence de résine dans la coupe diagonale.
- Les profils de pyramides sont bien décrits dans toutes les directions.

4.7 Conclusion

La calibration du modèle de développement a permis de déterminer les paramètres qui décrivent au mieux les profils expérimentaux obtenus avec FISH. Les résultats de la calibration doivent être analysés en prenant en compte les limitations du modèle résine au moment de la calibration :

1. Le defocus de l'image aérienne n'est pas pris en compte dans l'épaisseur de résine par le modèle d'exposition.
2. L'empilement n'est pas pris en compte dans sa totalité. Les phénomènes d'ondes stationnaires, de réflectivité, et d'inhibition de surface sont négligés.
3. La variété des profils utilisés pour la calibration reste limitée.

Il apparaît que les écarts des profils sont très faibles entre les deux modèles calibrés. Cela signifie que deux modèles de développement avec des paramètres différents peuvent donner des résultats proches. Néanmoins, il a été décidé de ne garder que les paramètres issus de la calibration du groupe 2. En effet, les profils de ce groupe sont tous mesurés à focus nul et présentent une plus grande diversité. Par conséquent, il est plus pertinent de retenir les paramètres issus de la calibration de ce groupe compte tenu des capacités du modèle résine au moment de la calibration à traiter les aspects de defocus.

Le principal défaut des modèles calibrés est leur manque de précision lors de la simulation de motifs denses à faible dose. Dans ces conditions, les profils résines se touchent horizontalement et verticalement avec les voisins. Les modèles calibrés sous-estiment systématiquement la hauteur à laquelle cette jonction se réalise. En revanche, pour des motifs isolés, les modèles calibrés se montrent beaucoup plus performants.

Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, la démarche de création du premier masque grayscale a été exposée et argumentée. Ce masque réalisé sans aucune connaissance du procédé a permis de confirmer que les approches existantes pour la création de masque grayscale ne permettent pas d'obtenir les structures aux dimensions visées dans le cadre de la thèse. L'exploitation du masque a permis de sélectionner une résine adaptée à la lithographie grayscale et de déterminer les paramètres permettant de simuler l'étape de développement de la résine sélectionnée. À cet égard, une attention particulière a été donnée aux pixellisations principales intégrées sur FISH pour répondre à ces deux problématiques.

La première partie du chapitre a été consacrée à l'étude de deux résines candidates pour les applications grayscale : la résine A et B. Le choix s'est porté sur la résine B pour différentes raisons : linéarité de la courbe de contraste, collaboration aisée avec le fabricant et meilleures capacités de figeage (étudiées hors cadre de la thèse). Deux empilements ont été étudiés. À l'issue de la deuxième année de thèse, le travail s'est concentré sur l'empilement de *type II* afin de s'aligner avec les problématiques imageurs de STMicroelectronics.

La seconde partie du chapitre a été consacrée à la calibration du modèle de développement. Cet étape a permis de déterminer les paramètres du modèle décrivant au mieux les profils résines obtenus avec FISH. Afin de déterminer ces paramètres une optimisation numérique a été réalisée sur deux groupes de profils expérimentaux mesurés à l'AFM en configuration dense et isolée. Le premier groupe était constitué uniquement de motifs de microlentilles à différentes doses et valeurs de focus. Le second groupe était quant à lui constitué de motifs plus variés : microlentilles, pyramides, cuvettes à différentes doses à focus nul. Les paramètres obtenus par calibration sont différents pour les deux groupes. Cependant, les profils obtenus en simulation avec les deux modèles calibrés se sont avérés extrêmement proches.

Malgré ces similitudes, le choix a été fait de ne conserver que les paramètres associés au groupe 2. En effet, les profils de ce groupe présentent une plus grande variété et sont tous mesurés à focus nul. Le defocus à travers l'épaisseur de résine n'étant pas pris en compte par le modèle, un focus nul est préférable. Les résultats de la calibration doivent être analysés en prenant en compte la maturité du modèle résine au moment de la calibration. Le but du modèle résine n'est pas d'être parfait. Son rôle est de décrire avec le moins de complexité possible et avec la meilleure précision les profils résines obtenus.

À l'issue de ce chapitre nous disposons donc d'un modèle lithographique complet permettant de simuler le profil résine obtenu pour un masque grayscale et des conditions de procédé. Le chapitre suivant traite de l'inversion du modèle dans le but d'optimiser un masque grayscale afin d'obtenir une forme donnée dans la résine se rapprochant le plus du profil désiré.

Chapitre 5

Optimisation de masque grayscale

Résumé du chapitre

Dans le chapitre précédent la calibration du modèle de développement a été présentée. À ce stade, le modèle lithographique est donc complet : à partir d'un masque donné il est possible de simuler le profil résine obtenu pour des conditions d'exposition et de développement données. Le problème peut être modélisé de manière directe, à savoir du masque vers le profil résine.

Ce chapitre expose l'approche utilisée pour répondre à la problématique de la thèse : comment, pour des conditions de procédé fixées, déterminer le masque grayscale idéal permettant d'obtenir une forme donnée dans la résine ?

Dans un premier temps, la méthodologie innovante de préparation de masque sera présentée. Cette dernière vise à optimiser la taille ainsi que la position des plots de chrome sur le masque de manière à obtenir un profil résine cible. Des considérations sur les temps de calcul du modèle et la convergence de l'optimiseur ont motivé la segmentation de l'optimisation du masque en deux étapes. La première consiste à optimiser le masque en utilisant uniquement le modèle optique à partir d'une image aérienne cible. Le masque obtenu à l'issue de cette première optimisation est donc un masque intermédiaire qui sera amélioré lors d'une seconde optimisation en utilisant le modèle complet et le profil résine cible.

La méthodologie permettant de déterminer l'image aérienne cible à partir du profil cible sera détaillée. Nous verrons également que les considérations de symétrie des motifs permettront d'accélérer le processus d'optimisation en minimisant le nombre de paramètres à considérer.

Cette méthodologie a été utilisée pour créer les pixellisations grayscale d'un second masque appelé ORCA. Une partie des pixellisations obtenues par cette méthode de préparation de masque sera présentée. Enfin, le chapitre se terminera par la comparaison entre les profils expérimentaux obtenus avec le masque ORCA et ceux attendus en simulation afin de conclure sur la qualité de la méthodologie d'optimisation de masque et son domaine d'application.

5.1 Méthodologie d'optimisation de masque

La Figure 5.1 ci-dessous est un rappel du modèle lithographique. Les paramètres du modèle de développement étant désormais calibrés, l'étape suivante consiste à traiter le problème inverse à savoir : comment déterminer le masque grayscale associé à un profil résine ? Le problème inverse est illustré par le trait en pointillés sur la Figure 5.1 ci-dessous.

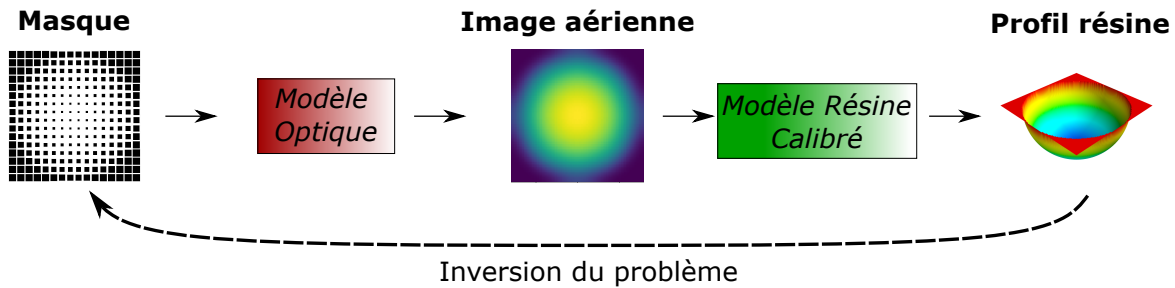


FIGURE 5.1 – Illustration du modèle lithographique direct (flèches continues) et de l'inversion du problème (flèche en pointillés).

Une des approches possibles afin d'inverser un problème est de résoudre itérativement le problème direct de manière à converger vers une solution optimale. Ce type d'approche nécessite l'utilisation d'un optimiseur numérique de manière à explorer efficacement l'espace des paramètres. Les paramètres à optimiser sont ici les caractéristiques géométriques des plots de chrome sur le masque (tailles et positions). Le temps de calcul du modèle est un paramètre clef puisque l'optimiseur va réaliser de très nombreux appels au modèle durant le processus d'optimisation du masque. Dans notre cas, le temps de calcul n'est pas anodin. Le Tableau 5.1 ci-dessous regroupe le temps de calcul du modèle optique (simulation d'image aérienne) et du modèle complet (simulation de l'image aérienne, de l'exposition et du développement) évalués pour différents maillages.

TABLE 5.1 – Temps de calcul du modèle optique et du modèle complet pour différentes discrétisations pour une itération de calcul (moyenne sur 100 itérations).

Modèle Optique		Modèle Complet (Optique + Résine)	
<i>Discrétisation</i>	<i>Temps de calcul</i>	<i>Discrétisation</i>	<i>Temps de calcul</i>
51·51	1.34s	51·51·51	1.67s
101·101	2.16s	101·101·51	4.27s
201·201	4.73s	101·101·101	8.51s

Pour des raisons évidentes, le temps de calcul du modèle optique est beaucoup plus rapide que celui du modèle complet. Cette observation a été un des éléments aboutissant à la séparation de l'optimisation du masque en deux étapes. L'idée est d'utiliser dans un premier temps uniquement le modèle optique de manière à obtenir un masque intermédiaire puis de basculer sur le modèle complet afin de terminer l'optimisation (nous verrons plus loin que cette séparation assure également la convergence de la seconde optimisation).

Cette séparation requiert la capacité à déterminer à partir d'un profil résine cible P_{tgt} , l'image aérienne I_{tgt} s'approchant de l'image aérienne réelle qui permettrait d'obtenir le profil P_{tgt} si la résine y était exposée. Cette étape consiste en quelque sorte à inverser le modèle résine de manière à déterminer l'image aérienne utilisée en entrée.

La Figure 5.2 ci-dessous illustre le principe d’optimisation du masque en deux étapes (1 et 2) ainsi que la conversion du profil résine cible vers l’image aérienne cible (étape 0).

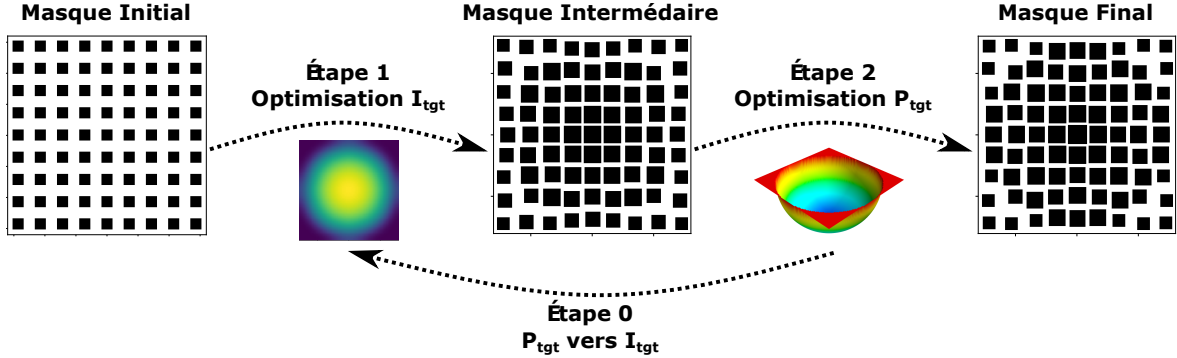


FIGURE 5.2 – Schéma de principe de l’optimisation de masque en deux étapes et de la conversion de P_{tgt} vers I_{tgt} .

Les différentes étapes de la Figure 5.2 font l’objet des sections suivantes. Nous débuterons par la description de l’optimisation numérique utilisée à l’étape 1 et 2 puis aborderons la conversion de P_{tgt} vers I_{tgt} dans un second temps.

Afin d’illustrer visuellement les explications deux microstructures seront utilisées :

- Une microlentille de rayon 1400nm et de période 3200nm (considérée isolée).
- Une pyramide à base carrée de hauteur 700nm et de période 1400nm (configuration dense).

5.2 Optimisation du masque

Deux stratégies d’optimisation sont possibles. La première vise à optimiser seulement la taille des plots de chrome à l’image des masques PWM. On parle d’optimisation *fixe*. La seconde, appelée optimisation *libre*, consiste à optimiser à la fois la taille des plots de chrome et leurs positions (combinaison entre PWM et PDM). Cette méthode nécessite donc d’optimiser 3 fois plus de paramètres (taille, position x et position y).

5.2.1 Choix de l’optimiseur

Les éléments à optimiser sont des dimensions physiques à savoir les tailles et positions des plots de chrome sur le masque. L’ordre de grandeur de ces éléments est de plusieurs dizaines de nanomètres. Afin de réaliser cette optimisation, la fonction **least squares** de la librairie `scipy.optimize` est utilisée [Scipy, 2020a]. Cette dernière convient aux problèmes d’optimisation locaux (vis-à-vis de la taille des paramètres à optimiser) et est basée sur un calcul à descente de gradient. Cette fonction permet également d’imposer des limites aux variables ce qui sera utile pour assurer le respect des règles de dessin.

Les paramètres à optimiser sont fournis à l’optimiseur sous forme d’une liste qui dépend de la stratégie d’optimisation choisie. En notant s_i la taille du i -ème plot et (x_i, y_i) ses coordonnées sur le masque, les listes sont définies comme suit :

- Si optimisation *fixe* : $[s_1, s_2, \dots]$
- Si optimisation *libre* : $[s_1, x_1, y_1, s_2, x_2, y_2, \dots]$

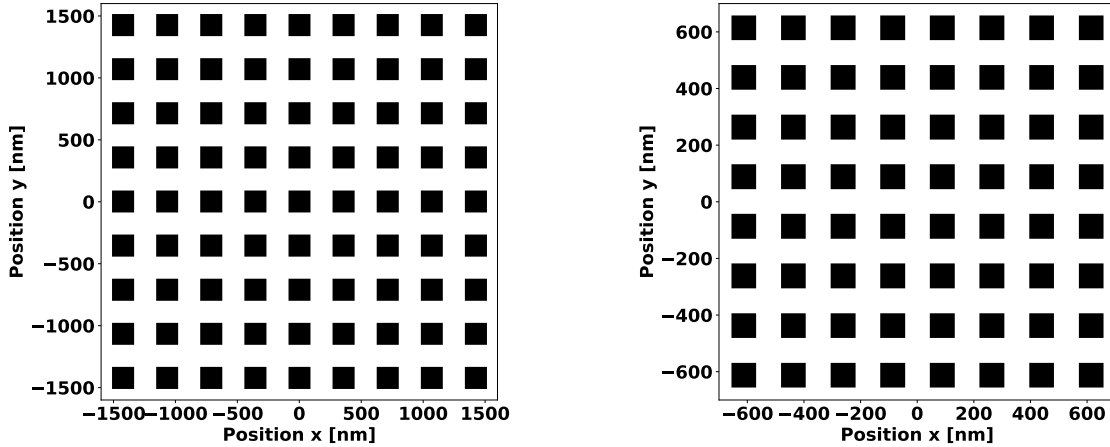
L’optimiseur va donc parcourir les éléments de la liste un à un au cours de l’optimisation. Pour chacun de ces éléments, l’optimiseur va calculer l’impact d’un déplacement élémentaire

de manière à déterminer la pente associée à la fonction de coût (descente de gradient). La matrice associée à ce calcul est appelée matrice Jacobienne. Une fois que l'optimiseur a terminé de parcourir chaque élément de la liste, la matrice Jacobienne est utilisée de manière à mettre à jour les éléments de la liste. Cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt de l'optimiseur soit atteint.

5.2.2 Initialisation

Il est nécessaire de déterminer un point de départ pour réaliser l'optimisation. Ce point de départ correspond à un masque neutre. Le choix de ce masque initial est laissé à l'utilisateur dans une certaine mesure par l'intermédiaire de la période initiale et du nombre de plots à positionner le long de chaque axe : N_{plots} . Les masques optimisés sont de géométrie carrée, le nombre de plots le long de l'axe x et de l'axe y est identique au moment de l'initialisation. Les plots sont positionnés sur une grille régulière définie par la période fournie par l'utilisateur. La taille initiale des plots de chrome est fixée à la moitié de la période.

La Figure 5.3 ci-dessous présente les masques initiaux pour les profils de microlentille et de pyramide décrits précédemment.



(a) Masque initial pour l'optimisation de la microlentille, $N_{plots} = 9$ (période initiale de 355nm). (b) Masque initial pour l'optimisation de la pyramide, $N_{plots} = 8$ (période initiale de 175nm).

FIGURE 5.3 – Masques initiaux pour l'optimisation de la microlentille et de la pyramide.

Le choix de ce type de masque comme point de départ est cohérent puisque tous les plots sont de la même taille et disposent du même espace pour évoluer autour d'eux. L'impact de la période et du nombre de plots initiaux a été étudié pendant la thèse par un membre de l'équipe du laboratoire d'accueil. Ces travaux ont permis de sélectionner les configurations optimales de départ pour chaque motif de résine visé. Les résultats de cette étude sont disponibles dans un rapport interne [Henry, 2020].

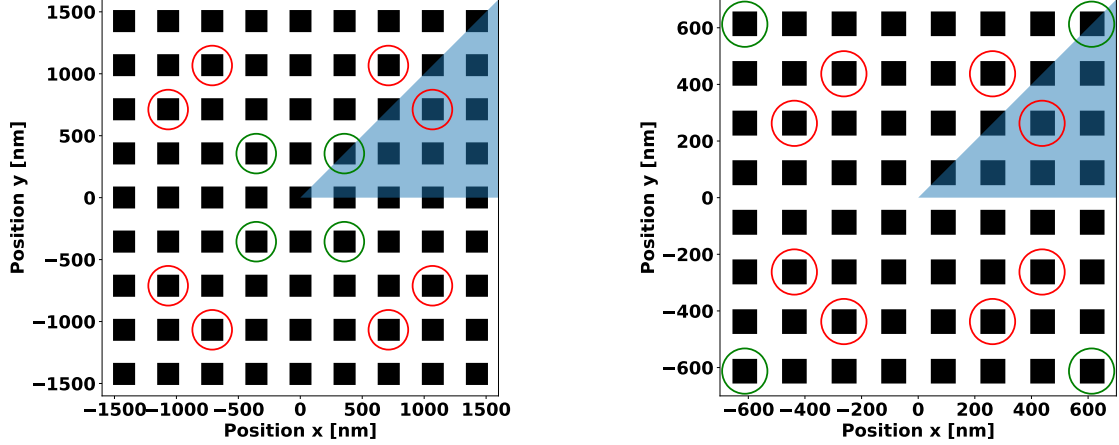
5.2.3 Paramètres à optimiser

Si aucune considération de symétrie n'est prise en compte, le nombre de paramètres à optimiser (noté N_{par}) est directement proportionnel au nombre de plots sur le masque ($N_{par} = N_{plots}^2$ si stratégie *fixe*, et $N_{par} = 3N_{plots}^2$ si stratégie *libre*).

Afin de réduire le nombre de paramètres à optimiser, il est judicieux de considérer les symétries du problème. Lorsque le profil résine présente une symétrie dans le plan xy , il est raisonnable de s'attendre à ce que cette dernière se retrouve également au niveau du masque. En pratique, cela signifie que certains plots de chrome sur le masque occupent la même fonction

vis-à-vis de la formation du profil résine à différents endroits. Dans le cas de la microlentille et de la pyramide à base carrée, le degré de symétrie permet de ne considérer qu'un huitième du masque total pour le reconstruire dans sa totalité. On parlera de symétrie $1/8$.

La Figure 5.4 ci-dessous illustre les symétries reportées au niveau des masques initiaux de la Figure 5.3. La zone bleue correspond à la portion de masque élémentaire permettant de générer la totalité du masque. Deux exemples sont donnés pour illustrer l'impact de la symétrie. Ainsi, les polygones entourés en rouge présentent une symétrie $1/8$, ceux en vert une symétrie $1/4$.



(a) Symétries du masque initial pour la microlentille.

(b) Symétries du masque initial pour la pyramide.

FIGURE 5.4 – Illustration des symétries au niveau des masques initiaux. Les plots à l'intérieur de la zone bleue sont suffisants pour reconstruire la totalité du masque. Les plots entourés d'un cercle de même couleur sont identiques d'un point de vue symétrique.

Dans le cas où le profil présente une symétrie $1/8$ (le cas le plus fréquent dans la thèse), le nombre de paramètres à optimiser, N_{par} , peut être calculé en fonction de la parité du nombre de plots N_{plots} :

$$\text{Si } N_{plots} = 2p \text{ avec } p \in \mathbb{N} \text{ alors } N_{par} = \frac{N_{plots}(N_{plots} + 2)}{8} \quad (5.1a)$$

$$\text{Si } N_{plots} = 2p + 1 \text{ avec } p \in \mathbb{N} \text{ alors } N_{par} = \frac{(N_{plots} + 1)(N_{plots} + 3)}{8} \quad (5.1b)$$

Le Tableau 5.2 ci-dessous regroupe le nombre de paramètres à optimiser pour les masques de la Figure 5.4, en fonction du type d'optimisation (*fixe* ou *libre*) et du degré de symétrie considéré.

TABLE 5.2 – Nombre de paramètres à optimiser en fonction du type d'optimisation et des considérations de symétries.

Nombre de plots	Aucune symétrie		Symétrie $1/8$	
	$N_{plots} = 8$	$N_{plots} = 9$	$N_{plots} = 8$	$N_{plots} = 9$
Optimisation <i>Fixe</i>	$N_{pars}=64$	$N_{pars}=81$	$N_{pars}=10$	$N_{pars}=15$
Optimisation <i>Libre</i>	$N_{pars}=192$	$N_{pars}=243$	$N_{pars}=30$	$N_{pars}=45$

En réalité le nombre de paramètres à optimiser est plus petit que celui annoncé dans le Tableau 5.2. Les plots situés le long de la diagonale ne nécessitent par exemple que d'être

optimisé pour leur taille et une seule position (x et y étant reliés). C'est également le cas des plots situés le long de l'axe des abscisses dans le cas où N_{plots} est impair. Cependant, afin de simplifier l'optimisation numérique tous les plots sont optimisés de la même manière : en taille, position x et position y .

Nous verrons en pratique que les plots situés sur la diagonale ou l'axe des abscisses restent alignés avec la position qui assure la symétrie $1/8$. L'optimiseur conserve naturellement la symétrie en quelque sorte.

L'apport de la symétrie est donc considérable pour simplifier le problème d'optimisation en réduisant le nombre de paramètres à traiter. La plus grande partie des motifs de résine étudiés dans le cadre de cette thèse présente une symétrie $1/8$. Malheureusement, les autres types de symétrie, notamment la symétrie miroir, n'ont pas été implémentés par manque de temps. Lorsque des motifs avec une symétrie miroir sont optimisés, ils sont considérés comme n'ayant aucune symétrie.

5.2.4 Fonction de coût

La fonction de coût, à l'image de celle utilisée dans le chapitre 4, permet à l'optimiseur de connaître la qualité de son optimisation à un instant donné. La norme L_2 est utilisée pour les deux optimisations (étapes 1 et 2). Le Tableau 5.3 ci-dessous détaille la fonction de coût utilisée pour chaque type d'optimisation.

TABLE 5.3 – Fonctions de coût pour l'optimisation de masque à partir du modèle optique et du modèle complet.

Type d'optimisation	Étape 1 <i>Modèle optique</i>	Étape 2 <i>Modèle complet</i>
Fonction de coût	$C_i = \langle \sqrt{(I_{tgt} - I_i)^2} \rangle$	$C_i = \langle \sqrt{(P_{tgt} - P_i)^2} \rangle$

I_{tgt} et P_{tgt} correspondent à l'image aérienne et au profil résine cible. I_i et P_i correspondent à l'image aérienne et au profil résine simulés à l'itération i du processus d'optimisation. La notation $\langle \rangle$ correspond à la valeur moyenne.

Contrairement à la calibration du modèle de développement la fonction de coût n'est ici évaluée que sur un seul profil. Un aspect crucial lors de l'optimisation est la sensibilité de la fonction de coût à la variation des paramètres explorés. Si lors de l'optimisation les déplacements élémentaires n'induisent pas de modification de la fonction de coût, l'optimiseur en conclura qu'il a déjà trouvé le minimum et s'arrêtera. Ce problème est rencontré lorsque l'étape 2 est réalisée directement sans utiliser le masque élémentaire de l'étape 1. Les variations de tailles et de positions des plots du masque initial ne sont pas suffisantes pour induire un changement dans le profil résine simulé et donc dans la fonction de coût. Le masque initial est donc retourné inchangé.

En comparaison, de très légères variations dans l'agencement des plots du masque initial induisent une modification de l'image aérienne. Il est donc nécessaire de débiter l'optimisation du masque à partir de l'image aérienne cible I_{tgt} afin d'obtenir un masque intermédiaire proche du résultat final. L'agencement des plots sur le masque intermédiaire permet la convergence de l'étape 2 car le profil résine obtenu avec le masque intermédiaire est désormais sensible à de légères variations de leur géométrie.

Remarques sur le pas de l'optimiseur

Lors de l'exploration de l'espace des paramètres, l'optimiseur détermine le déplacement élémentaire à utiliser (aussi appelé le pas). Il est possible de modifier la valeur de ce pas lors de la première itération d'exploration. En utilisant un pas plus important que celui par défaut il est possible d'éviter à l'optimiseur de rester bloqué sur les paramètres initiaux. Bien sûr, une fois le premier Jacobien calculé, l'optimiseur détermine lui même les prochaines valeurs des pas d'exploration et les adapte de manière à ne pas osciller autour de la solution. Il est donc théoriquement possible de modifier le pas initial pour parvenir à faire converger l'optimisation de l'étape 2, sans passer par le masque intermédiaire. Cependant, cette approche n'a pas été conservée puisqu'il n'existe pas de pas initial universel permettant de traiter tous les motifs visés dans le cadre de la thèse.

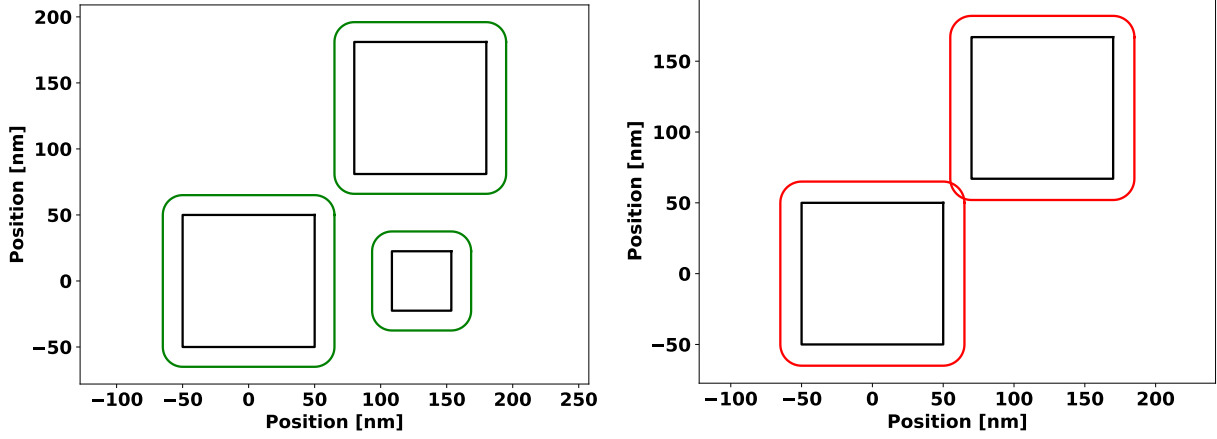
5.2.5 Respects des règles de dessin du masque

Lors de l'optimisation de masque, les règles de dessin doivent être respectées. Pour rappel, les deux règles principales sont les suivantes :

1. Respect du minCD : ne pas dessiner de plot de chrome dont le côté est plus petit que la valeur de minCD.
2. Respect du minSPACE : maintenir une distance minimale entre deux plots de chrome supérieure ou égale à la valeur de minSPACE

Concernant le respect du minCD, il suffit simplement de renseigner cette valeur au moment de la définition des bornes des variables lors de la création de l'optimiseur. Lorsque l'optimisation est *fixe*, c'est également en utilisant les bornes que la condition de minSPACE est assurée : la taille maximale que peut prendre un plot de chrome est fixée à la période initiale moins le minSPACE. En revanche, pour l'optimisation *libre*, le contrôle du minSPACE est plus compliqué puisque les plots de chrome se déplacent au cours de l'optimisation.

Afin de contrôler le respect du minSPACE en optimisation *libre*, un *buffer* est appliqué autour de chaque plot de chrome. Ce buffer est un polygone fermé composé des points situés à une distance inférieure ou égale à la moitié du minSPACE autour du plot de chrome considéré. La Figure 5.5 ci-dessous illustre l'utilisation des buffers pour repérer les erreurs de placement. Sur la Figure 5.5a les plots de chrome sont en noir et les buffers en vert. On constate qu'il n'y a pas de chevauchement entre les buffers. Par conséquent, les distance de minSPACE sont respectées. En revanche, sur la Figure 5.5b, les buffers en rouge se chevauchent ce qui signifie qu'un ou plusieurs points des deux plots de chrome sont plus situés à une distance inférieure au minSPACE.



(a) Plots de chrome respectant la condition de minSPACE.

(b) Plots de chrome ne respectant pas la condition de minSPACE.

FIGURE 5.5 – Méthodologie de vérification du minSPACE sur un masque avec l'utilisation de buffers.

D'une certaine manière, l'aire de chevauchement entre *buffers* est un indicateur de la gravité du non respect de la règle du minSPACE. Lorsque l'aire est nulle, le critère est respecté : aucun *buffer* ne chevauche un autre. Dès que l'aire n'est plus nulle, le critère n'est pas respecté à un endroit du masque. Plus l'aire de chevauchement augmente, plus le nombre d'infractions et/ou leur gravité augmente. Cette vérification est réalisée sur la totalité des plots de chrome constituant le masque au cours de l'optimisation.

Au cours de l'optimisation, un ratio est calculé de manière à déterminer la qualité de l'optimisation vis-à-vis du minSPACE. Ce ratio, noté r_{MRC} ¹ correspond à l'aire de tous les *buffers* divisée par l'aire de l'union de tous les *buffers*. En notant A_{b_n} , l'aire du n-ième *buffer*, la définition mathématique de r_{MRC} est la suivante :

$$r_{MRC} = \frac{\sum_n A_{b_n}}{\bigcup_n A_{b_n}} \quad (5.2)$$

Lorsque le minSPACE est respecté sur la totalité du masque ce ratio est égal à 1. Lorsque l'intersection entre deux ou plusieurs *buffers* n'est pas nulle, ce coefficient devient plus grand que 1.

Dans la définition de la fonction de coût, lors du calcul du coût à l'itération i , le ratio r_{MRC} est calculé. Si ce dernier est différent de 1, le coût de l'itération est égal à celui de l'itération précédente ($i-1$) multiplié par r_{MRC} . De cette manière, on indique à l'optimiseur que la direction explorée n'est pas bonne pour sa descente de gradient. L'optimisation n'aboutit donc jamais sur un masque ne respectant pas les règles MRC.

Le Tableau 5.4 ci-dessous regroupe les différentes fonctions de coût en fonction du critère r_{MRC} .

1. Pour rappel MRC se réfère aux règles de dessin du masque.

TABLE 5.4 – Fonctions de coût avec prise en compte du facteur r_{MRC} .

Type d'optimisation	Fonction de coût
Étape 1 <i>Modèle optique</i>	$C_i = \begin{cases} \sqrt{(I_{tgt} - I_i)^2} & \text{si } r_{MRC} = 1 \\ \sqrt{(I_{tgt} - I_{i-1})^2} \cdot r_{MRC} & \text{si } r_{MRC} > 1 \end{cases}$
Étape 2 <i>Modèle complet</i>	$C_i = \begin{cases} \sqrt{(P_{tgt} - P_i)^2} & \text{si } r_{MRC} = 1 \\ \sqrt{(P_{tgt} - P_{i-1})^2} \cdot r_{MRC} & \text{si } r_{MRC} > 1 \end{cases}$

Il existe probablement des stratégies plus élaborées pour interdire certains sous-espace de paramètres à l'optimiseur.

5.2.6 Critère d'arrêt

L'expérience a montré que l'optimisation de masque pouvait atteindre des durées très importantes alors qu'un degré de convergence suffisant était atteint après quelques évaluations de Jacobien. À partir d'un certain stade l'optimiseur ne réalise plus que des sauts de fourmi dans son exploration des paramètres ce qui n'est plus pertinent (on ne pourra pas écrire un plot de chrome au dixième d'Angström près.). Le paramètre d'arrêt *max nfev* de la fonction *least squares* a été modifié pour limiter la durée de l'optimisation. Ce critère indique le nombre total de Jacobien calculés. Pour la première optimisation (l'image aérienne) ce critère est fixé à 5. L'optimiseur va donc calculer un premier Jacobien en faisant varier les paramètres puis mettre à jour ces paramètres, recalculer un Jacobien et ceci 5 fois. Pour la seconde optimisation (modèle complet) ce critère est fixé à 10.

5.2.7 Retrait des plots de chrome inutiles

Une fois le masque optimisé, une dernière étape peut être rajoutée de manière à supprimer les plots de chrome inutiles sur le masque. En effet, à l'issue de l'optimisation, certains plots de chrome sur le masque ne sont pas nécessaires. Cet étape de «nettoyage», consiste à évaluer l'apport de chaque plot de chrome à la formation du profil résine. Si la fonction de coût diminue lorsqu'un plot de chrome est retiré, cela signifie qu'il n'est pas nécessaire de le garder sur le masque. Le retrait des plots de chrome n'a été intégré que pour l'optimisation *libre* lors de l'optimisation du profil résine.

5.2.8 Conclusion

L'optimisation de masque grayscale est donc un processus numérique complexe d'optimisation sous contraintes. La durée d'optimisation d'un masque est directement corrélée à la vitesse à laquelle la fonction de coût est calculée. Cette dernière doit également être capable de rendre compte des variations des paramètres optimisés sous peine de ne pas converger. Ces aspects ont motivé la séparation de l'optimisation en deux étapes : une première optimisation utilisant seulement le modèle optique suivie d'une optimisation utilisant le modèle complet. Cette division de l'optimisation en deux étapes est conditionnée par notre capacité à déterminer l'image aérienne cible I_{tgt} associée à un profil résine P_{tgt} . La méthodologie permettant d'aboutir à ce résultat fait l'objet de la section suivante.

5.3 Détermination de l'image aérienne cible I_{tgt} à partir du profil résine cible P_{tgt}

Dans cette section, la méthodologie développée afin de déterminer l'image aérienne associée à un profil résine est détaillée étape par étape. Le but de la méthode n'est pas de déterminer l'image aérienne parfaite mais de s'en rapprocher suffisamment pour permettre à la convergence de l'étape 2. La détermination de I_{tgt} étant un procédé itératif le suffixe n sera utilisé pour se référer à la n -ième itération. À nouveau, les motifs de microlentille et de pyramide seront utilisés pour illustrer la méthodologie de correction. La hauteur de résine initiale est de 1600nm, la dose utilisée est de 1500J/m², le focus est nul.

• Étape 0 : définition du profil résine cible

Définir un profil résine cible, $P_{tgt}(x, y)$. Chaque point du profil doit être positif ou nul. Ce profil est défini sur un support de taille $[n_x, n_y]$. La notation $P_{tgt}[n_x, n_y]$ sera utilisée pour se désigner le point correspondant à la valeur du profil en (x, y) .

• Étape 1 : calcul de la courbe de contraste théorique

On commence par établir une courbe de contraste théorique avec le modèle résine, en utilisant le modèle de développement 1D (3.39) (page 70). Le modèle 1D permet de supprimer la périodicité aux limites, et de négliger les fronts de développements 3D (chaque point de l'image aérienne n'affecte que le point de résine correspondant). Pour cela, une image aérienne linéaire entre 0 et 1 est utilisée. Le profil résine obtenu à partir de cette image aérienne est donc une rampe de résine qui peut être qualifiée de courbe de contraste théorique.

• Étape 2 : interpolation du profil résine

Le profil résine cible, $P_{tgt}[n_x, n_y]$, est interpolé avec la courbe de contraste théorique de manière à obtenir une première image aérienne, $I_{n=0}[n_x, n_y]$. Cette image aérienne est visible en pointillés sur la Figure 5.6 ci-dessous pour le motif de microlentille et de pyramide. Cette image aérienne ne permet pas d'obtenir le profil cible lorsque le développement est calculé en 3D (courbe rouge).

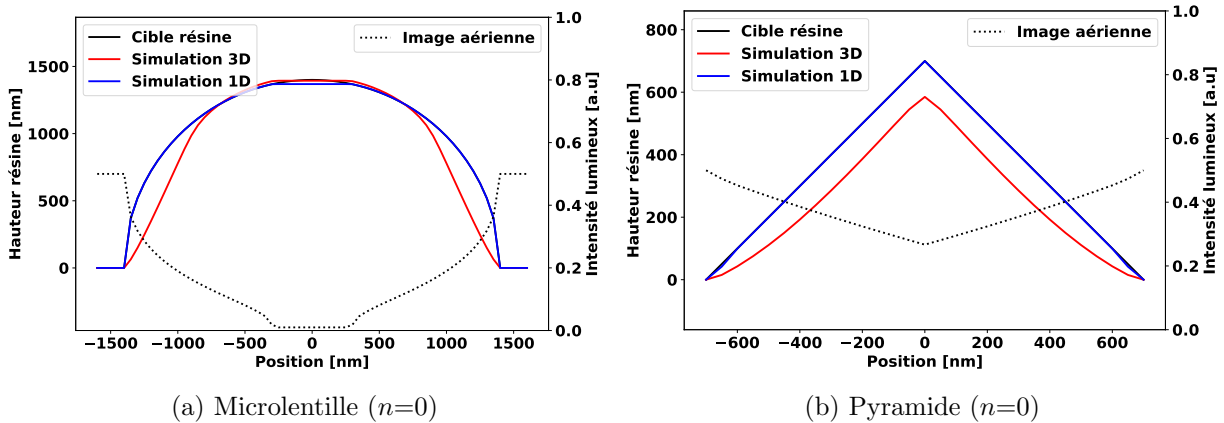


FIGURE 5.6 – Visualisation des profils résines obtenus en développement 1D et 3D en utilisant l'image aérienne initiale $I_{n=0}[n_x, n_y]$ pour le motif de microlentille et de pyramide.

Le profil résine obtenu avec le modèle de développement 3D en utilisant l'image aérienne $I_n[n_x, n_y]$ est noté $P_n[n_x, n_y]$. Le profil $P_{n=0}[n_x, n_y]$ ne correspond pas au profil attendu, il est donc nécessaire de corriger l'image aérienne $I_{n=0}[n_x, n_y]$ de manière à s'en rapprocher le plus possible. Le modèle de développement 3D est utilisé à partir de ce stade.

• **Étape 3 : calcul de la norme L_1**

Afin de quantifier les différences entre le profil cible $P_{tgt}[n_x, n_y]$ et $P_n[n_x, n_y]$ on calcule la norme L_1 normalisée :

$$L_{1,n}[n_x, n_y] = \frac{P_{tgt}[n_x, n_y] - P_n[n_x, n_y]}{\max |P_{tgt} - P_n|} \quad (5.3)$$

Le signe de la différence est important, c'est pour cette raison que la norme L_1 est utilisée et non pas le norme L_2 . Cette norme va être utilisée de manière à corriger l'image aérienne à l'itération n par l'intermédiaire d'un coefficient de correction noté $\Gamma_n[n_x, n_y]$. Idéalement on cherche à ce que la norme soit nulle en tout point, ce qui signifie que le profil résine simulé est identique au profil cible.

Supposons que pour un pixel de coordonnée $[n_x, n_y]$ la norme soit nulle, dans ce cas aucune correction ne doit être réalisée sur le pixel associé de l'image aérienne. La valeur de Γ pour ce pixel est fixée à 1. Si la norme d'un pixel n'est pas nulle, cela signifie que le profil résine P_n à ce pixel est trop ou pas assez élevée relativement à celui de P_{tgt} . La valeur de Γ va donc être choisie de manière à augmenter ou diminuer la valeur de l'image aérienne de ce pixel pour compenser cet effet. La correction appliquée sur le pixel de l'image aérienne n'excède pas 1% de la valeur du pixel. La fonction de correction Γ est définie par une fonction sigmoïde de manière à lisser au mieux les corrections selon la valeur de $L_{1,n}[n_x, n_y]$.

Enfin, la correction n'est effectuée que pour les pixels où l'écart entre le profil simulé et le profil cible est supérieur à 80%. Ce choix est purement empirique, la correction étant plus efficace si elle est réalisée dans ces zones en priorité. Au cours de la correction, les zones avec le plus d'écart au profil résine cible sont traitées puis, lorsque l'écart diminue, de nouvelles zones à fort écart émergent, sont corrigées et ainsi de suite.

La fonction de correction est définie par l'équation (5.4) ci-dessous.

$$\text{Si } |L_{1,n}[n_x, n_y]| < 0.8 \text{ alors } \Gamma_n[n_x, n_y] = 1 \quad (5.4a)$$

$$\text{Si } L_{1,n}[n_x, n_y] > 0.8 \text{ alors } \Gamma_n[n_x, n_y] = \frac{0.01}{1 + \exp[100(L_1 - 0.9 \max |P_{tgt} - P_n|)]} + 0.99 \quad (5.4b)$$

$$\text{Si } L_{1,n}[n_x, n_y] < -0.8 \text{ alors } \Gamma_n[n_x, n_y] = \frac{0.01}{1 + \exp[100(L_1 - 0.9 \max |P_{tgt} - P_n|)]} + 1. \quad (5.4c)$$

• **Étape 4 : Application de la correction**

Une nouvelle image aérienne «corrigée» est calculée, elle est le produit de l'image aérienne I_n avec la matrice Γ_n , élément à élément.

$$I_{n+1}[n_x, n_y] = I_n[n_x, n_y] \cdot \Gamma_n[n_x, n_y] \quad (5.5)$$

La Figure 5.7 illustre l'image aérienne au cours de la correction et les profils correspondants avec le développement 1D et 3D pour le motif de microlentille et de pyramide.

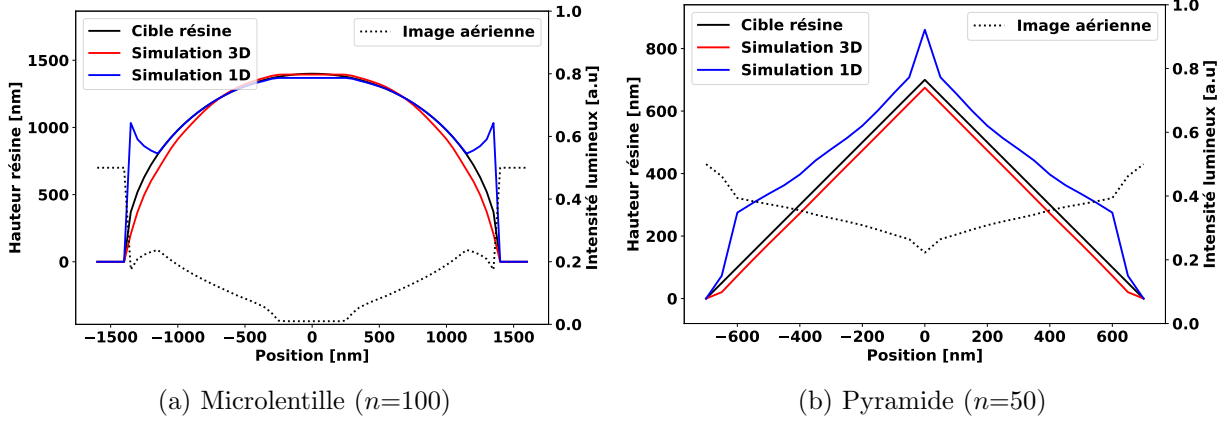


FIGURE 5.7 – Visualisation des profils résines obtenus en développement 1D et 3D au cours de la correction pour le motif de microlentille et de pyramide.

On remarque que le profil obtenu avec le développement 3D converge progressivement vers le profil cible tandis que le profil obtenu en développement 1D s'écarte du profil cible.

• **Boucle de correction**

Répétition des étapes 3 à 4 jusqu'à ce qu'une des conditions suivantes soit atteinte :

- $n = 500$, le nombre d'itérations maximal est fixé à 500.
- $L_{1,n}[n_x, n_y] = 0$ pour tout $[n_x, n_y]$, la correction est parfaite pour tous les points.
- Si $I_n[n_x, n_y] = I_{n+1}[n_x, n_y]$, l'image aérienne n'est plus corrigée.

Une fois cette étape terminée, l'image aérienne permettant de se rapprocher au mieux du profil résine cible est obtenue. Cette image aérienne ne doit pas nécessairement être parfaite. Rappelons à nouveau que le rôle de l'étape 1 est d'obtenir un masque intermédiaire de manière à permettre la convergence de l'étape 2. Nous verrons en pratique que le masque intermédiaire obtenu à l'étape 1 permet déjà de s'approcher du profil résine visé.

La Figure 5.8 ci-dessous présente le résultat de la correction. Les profils résine obtenus en développement 3D sont très proches des profils cibles. Le profil simulé en développement 1D est en quelque sorte un reflet de l'image aérienne. La pyramide est qualifiée d'«enterrée» puisqu'elle n'est définie que sur la première moitié de l'épaisseur de résine.

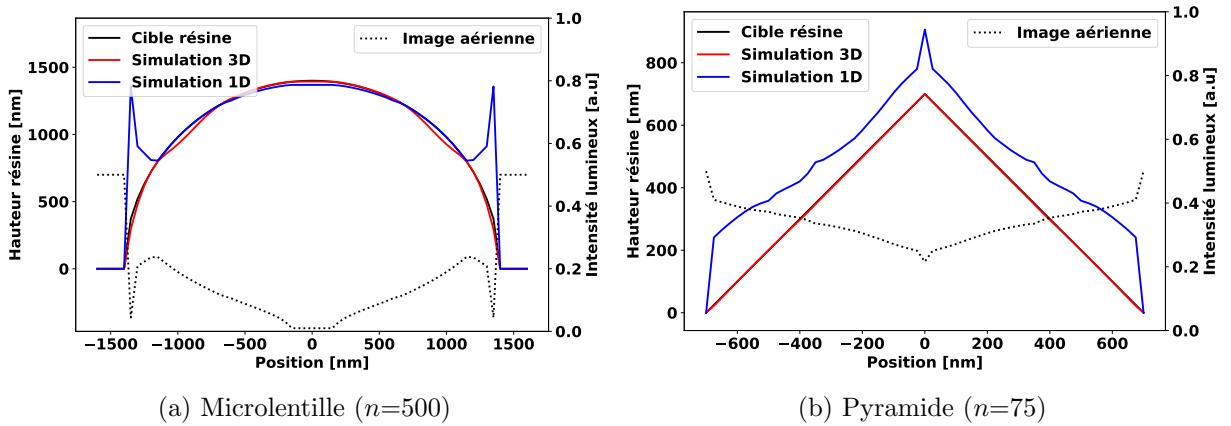


FIGURE 5.8 – Vue en coupe du profil cible et de l'image aérienne obtenue pour un profil de microlentille et de pyramide. Le profil rouge correspond au profil simulé avec l'image aérienne pour le modèle de développement 3D.

Concernant l'image aérienne obtenue pour la microlentille 5.8a, on note la présence de deux discontinuités dans les zones où le profil résine retombe à zéro (passage d'une intensité lumineuse de presque 0 à 0.5 abruptement). Il est déjà possible d'intuiter qu'un tel comportement lumineux ne pourra pas être obtenu facilement avec un masque réel. Le profil résine obtenu avec cette image aérienne est assez fidèle au profil résine cible : le sommet est très bien décrit, mais on note de légères oscillations sur les bords de la microlentille. Pour la pyramide 5.8b l'image aérienne est plus monotone et on obtient exactement le profil résine cible.

Concernant l'épaisseur de résine utilisée, la valeur de 1600nm a été choisie car il n'était pas possible d'obtenir des profils d'une hauteur maximale de 1400nm avec une épaisseur initiale de 1550nm (pour rappel c'est cette valeur d'épaisseur de résine qui a été utilisée pour les expositions de FISH). En effet, les paramètres obtenus à l'issue de la calibration rendent compte d'un phénomène de *dark erosion* qu'il faut contrebalancer en augmentant l'épaisseur de résine.

À ce stade, nous disposons d'une méthodologie relativement simple permettant de déterminer l'image aérienne associée à un profil résine donné. La section suivante illustre les masques obtenus à l'issue de l'optimisation appliquée aux images aériennes de la Figure 5.8.

5.4 Résultats d'optimisation de l'image aérienne

Dans cette partie, les résultats de l'optimisation à partir de l'image aérienne (étape 1) sont présentés pour les deux stratégies d'optimisation (*libre* et *fixe*) sur les motifs de microlentille et de pyramide.

5.4.1 Microlentille

La Figure 5.9 présente les masques obtenus à l'issue de l'étape 1 d'optimisation pour la stratégie *libre* et *fixe* sur le motif de microlentille.

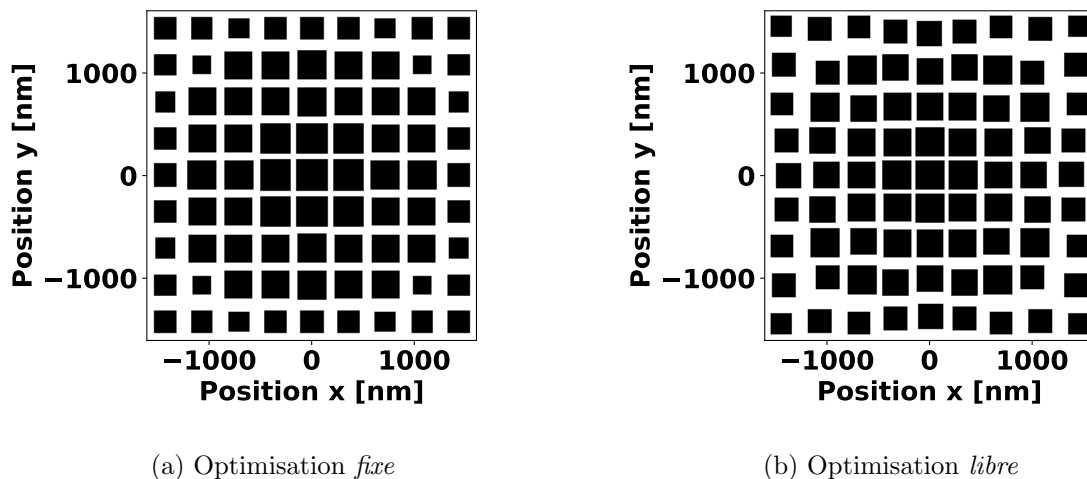


FIGURE 5.9 – Masques résultants de l'optimisation de l'image aérienne pour la stratégie *libre* et *fixe* pour le motif de microlentille.

On remarque que pour l'optimisation libre, ce sont particulièrement les plots de chrome situés en périphérie du masque qui ont été déplacés. La Figure 5.10 compare l'image aérienne obtenue avec les masques de la Figure 5.9 à l'image aérienne cible pour une coupe horizontale.

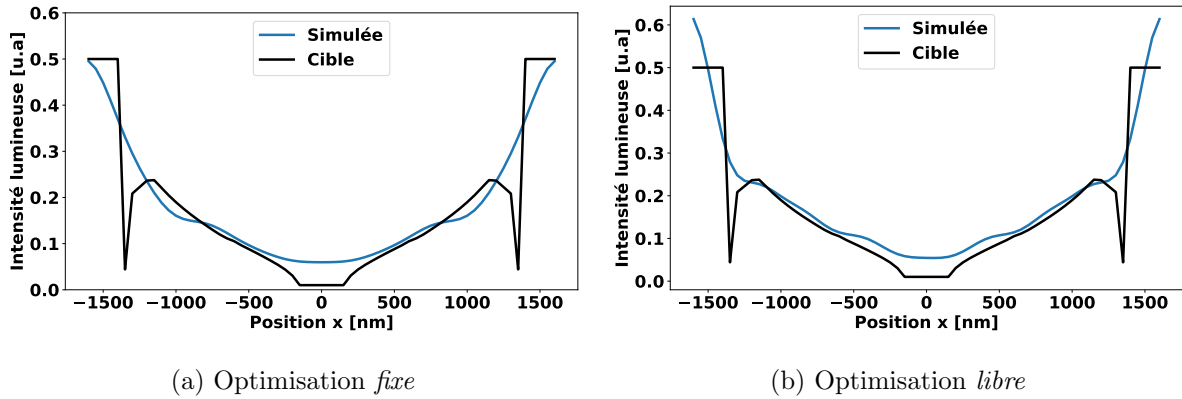


FIGURE 5.10 – Coupe horizontale de l’image aérienne obtenue avec l’optimisation *fixe* et *libre* vis-à-vis de l’image aérienne cible.

Le résiduel à la fin de l’optimisation (le coût final) est de 0.042 en optimisation *fixe* et de 0.0377 en optimisation *libre*. L’optimisation *libre* permet donc de mieux se rapprocher du profil d’intensité lumineuse visé. En revanche, la «cassure» verticale située en $x = \pm 1400\text{nm}$ est trop importante pour être reproduite en réalité. La Figure 5.11 ci-dessous présente les profils résines obtenus en utilisant les masques de la Figure 5.9.

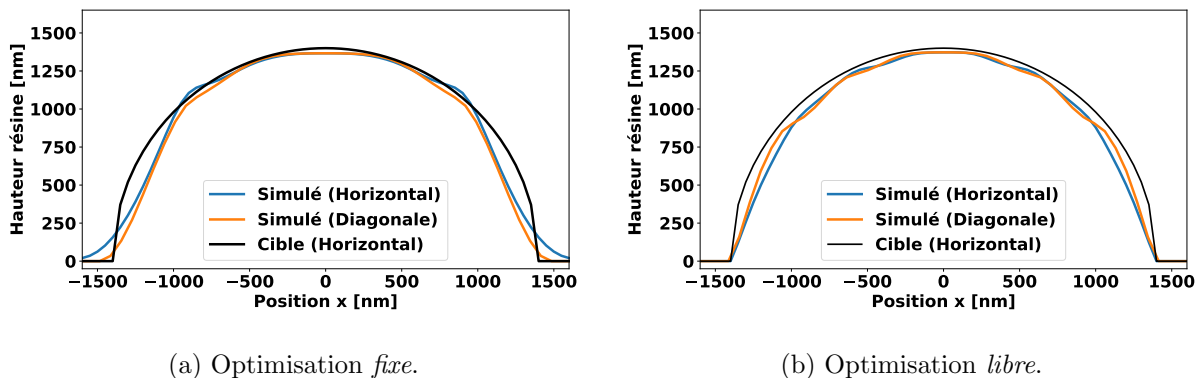
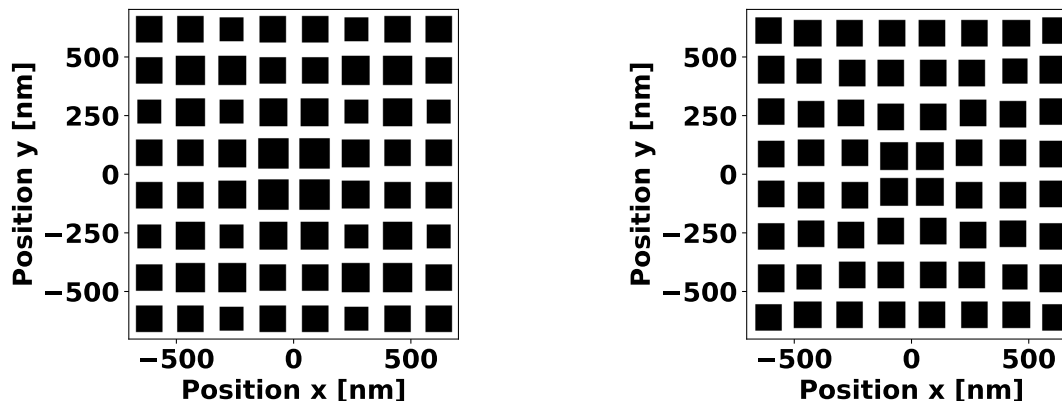


FIGURE 5.11 – Comparaison entre les profils horizontaux et diagonaux obtenus avec les masques optimisés et le profil résine cible pour le motif de microlentille.

Avec l’optimisation *fixe*, le sommet de la microlentille n’est pas très bien défini, de plus la courbure sur les bords de la microlentille ne correspond pas au profil visé. Avec la stratégie *libre*, le sommet est mieux défini. Les bords de la microlentille ne sont pas parfaitement alignés avec la cible, mais le profil résine épouse mieux la forme visée, à savoir une courbure douce et progressive. Le masque intermédiaire en optimisation *libre* est probablement déjà très proche du masque final. L’étape 2 consistera à «gonfler» le profil pour qu’il soit plus proche de celui visé.

5.4.2 Pyramide

La Figure 5.12 présente les masques obtenus à l’issue de l’étape 1 d’optimisation pour la stratégie *libre* et *fixe* sur le motif de pyramide.

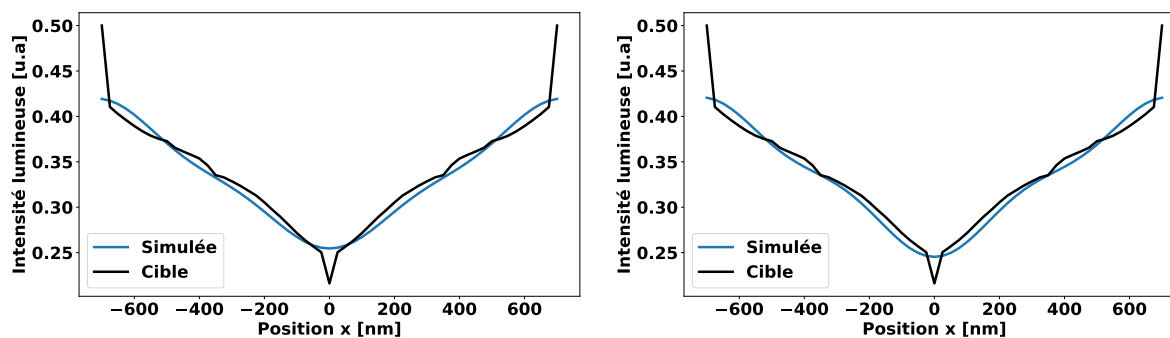

 (a) Optimisation *fixe*.

 (b) Optimisation *libre*.

 FIGURE 5.12 – Masques résultants de l’optimisation de l’image aérienne pour la stratégie *libre* et *fixe* pour le motif de pyramide.

On remarque ici le phénomène inverse de la Figure 5.9 : à savoir que ce sont préférentiellement les plots situés au centre du masque qui ont été déplacés dans le cadre de l’optimisation *libre*. Ceci peut s’expliquer par le fait que la hauteur maximale de la forme résine visée se situe à la moitié de l’épaisseur de résine étalée (1600nm). Il est donc nécessaire dans un premier temps de retirer la couche de résine superflue, puis de mettre en forme l’autre moitié. Cette «double-tâche» est plus délicate à obtenir avec un seul masque. La pointe visible sur en $x = 0nm$ sur le profil d’intensité cible peut également expliquer l’agencement des plots centraux.

La Figure 5.13 ci-dessous compare l’image aérienne obtenue avec les masques de la Figure 5.12 à l’image aérienne cible pour une coupe horizontale.


 (a) Optimisation *fixe*.

 (b) Optimisation *libre*.

 FIGURE 5.13 – Coupe horizontale des images aériennes obtenues avec l’optimisation *fixe* et *libre* vis-à-vis de l’image aérienne cible.

Le résiduel à la fin de l’optimisation (le coût final) est de 0.146 en optimisation *fixe* et de 0.148 en optimisation *libre*. Les images aériennes obtenues avec les deux stratégies sont assez proches mais c’est malgré tout l’optimisation *fixe* qui donne un meilleur résultat. Le «pic» en $x = 0nm$ n’est pas obtenu, ni ceux de part et d’autre du profil ($x = \pm 700nm$). Ces derniers correspondent à la transition du motif vers l’absence de résine. On s’attend donc à ce que les profils résines obtenus à ces endroits soient éloignés de la cible résine.

La Figure 5.14 ci-dessous présente les profils résines obtenus en utilisant les masques de la Figure 5.13.

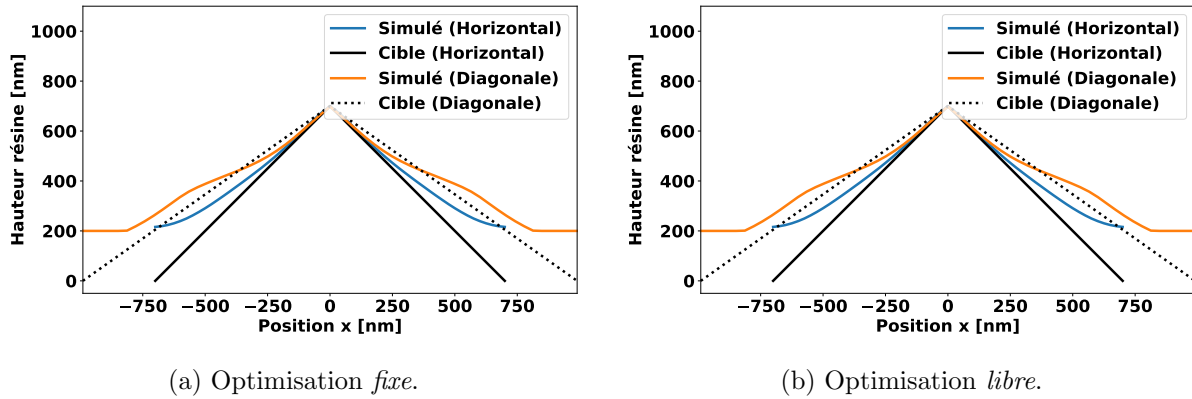


FIGURE 5.14 – Comparaison entre les profils horizontaux et diagonaux obtenus avec les masques optimisés et le profil résine cible pour le motif de pyramide.

Les profils résines obtenus avec les masques de la Figure 5.12 donnent des résultats sensiblement équivalents. L'incapacité de l'optimisation à reproduire fidèlement l'image aérienne cible sur les bords du motif s'observe clairement en pied de motif : la transition vers l'absence de résine n'est pas du tout obtenue, une épaisseur de 200nm de résine n'est pas creusée.

5.5 Optimisation du masque au profil résine

Une fois que le masque intermédiaire est calculé, l'étape 2 débute avec l'optimisation se basant sur le modèle complet de manière à affiner le masque intermédiaire en utilisant le profil résine cible pour calculer la fonction de coût. Le point de départ de cette optimisation est bien évidemment le masque intermédiaire.

Les sections suivantes présentent les résultats de l'optimisation complète pour le motif de microlentille et de pyramide.

5.5.1 Microlentille

La Figure 5.15 présente les masques obtenus à l'issue de l'optimisation complète pour la stratégie *libre* et *fixe* sur le motif de microlentille.

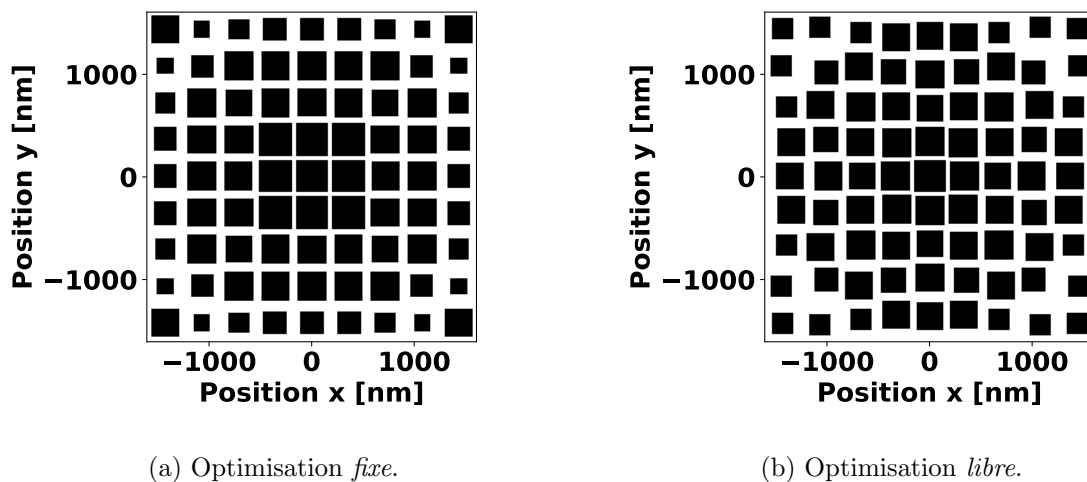


FIGURE 5.15 – Masques résultants de l'optimisation complète pour la stratégie *libre* et *fixe* pour le motif de microlentille.

Le résultat le plus frappant est le masque 5.15b : les plots se sont arrangés naturellement en forme circulaire, cohérente avec le profil de microlentille visé.

La Figure 5.16 présente les profils résines obtenus avec les masques de la Figure 5.15.

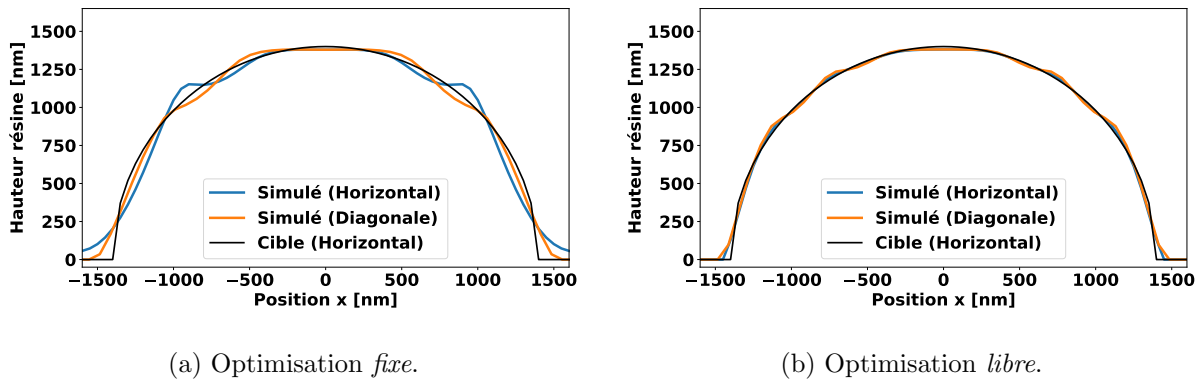


FIGURE 5.16 – Coupes horizontales et diagonales des profils résines obtenus en optimisation complète pour la stratégie *fixe* et *libre* sur le motif de microlentille.

Le résiduel à la fin de l’optimisation (le coût final) est de 40.55nm en optimisation *fixe* et de 14.96nm en optimisation *libre*. Le profil résine pour l’optimisation *fixe* est amélioré par rapport à la Figure 5.11a, particulièrement au niveau de la courbure en bord de motif. Cependant le motif reste encore éloigné du profil cible.

Avec l’optimisation *libre* la qualité du profil s’est grandement améliorée, notamment sur les bords de la microlentille. Les profils simulés et attendus sont presque confondus. En observant attentivement les profils, on note encore la présence d’oscillations autour du profil idéal sur le sommet de la microlentille. De plus, la sphéricité n’est pas parfaitement atteinte pour les hauteurs de résine comprises entre 0nm et 1000nm, le profil obtenu est relativement droit sur cette gamme de hauteur.

5.5.2 Pyramide

La Figure 5.17 présente les masques obtenus à l’issue de l’optimisation complète pour la stratégie *libre* et *fixe* sur le motif de pyramide.

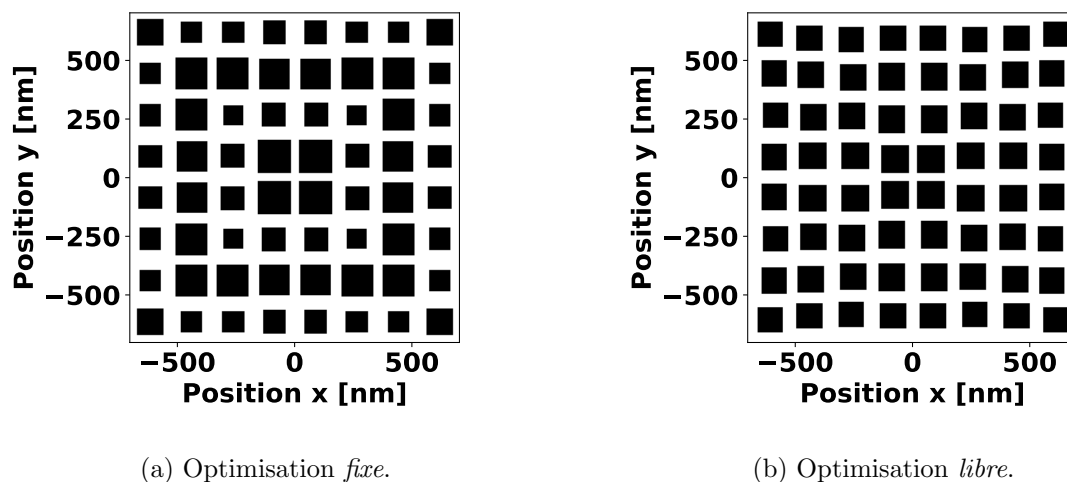


FIGURE 5.17 – Masques résultants de l’optimisation complète pour la stratégie *libre* et *fixe* pour le motif de pyramide.

La Figure 5.18 présente les profils résines obtenus avec les masques de la Figure 5.17.

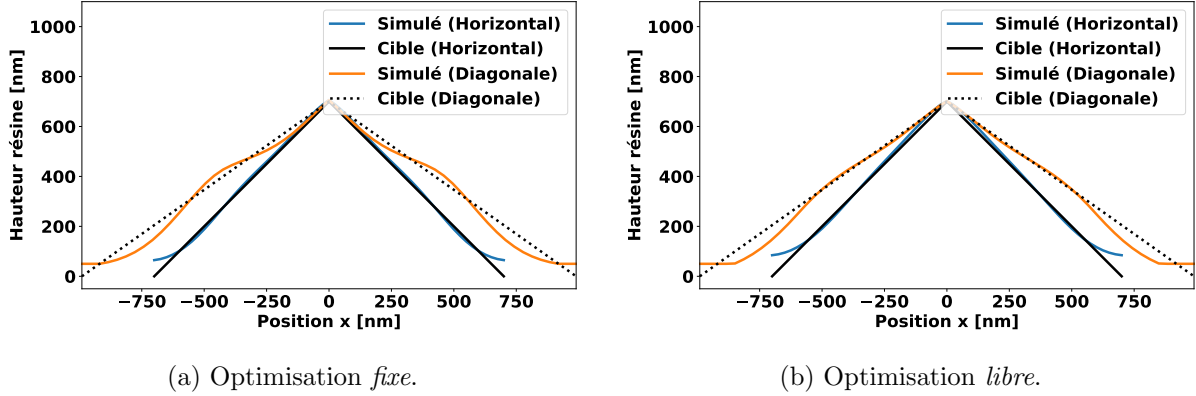


FIGURE 5.18 – Coupes horizontales et diagonales des profils résines obtenus avec l’optimisation complète pour la stratégie *fixe* et *libre* sur le motif de pyramide.

Le résiduel à la fin de l’optimisation (le coût final) est de 17nm en optimisation *fixe* et de 19.5nm en optimisation *libre*. L’optimisation *fixe* offre un résultat légèrement supérieur à l’optimisation *libre* pour ce motif même si les deux profils sont sensiblement identiques. Il n’est évidemment toujours pas possible d’obtenir un angle pointu au sommet de la pyramide, mais la base de cette dernière est bien mieux définie à présent. La jonction horizontale et diagonale avec les pyramides voisines se réalise à une hauteur plus basse que pour l’optimisation de l’image aérienne. Les pentes diagonales sont difficiles à obtenir, en optimisation *fixe* comme en optimisation *libre*.

5.5.3 Conclusion

Les résultats obtenus en simulation pour les différentes optimisations de masque présentées confirment la capacité théorique de cette approche. Il est possible de déterminer un masque grayscale permettant d’obtenir un profil s’approchant d’un profil cible donné. L’apport de l’optimisation *libre* sur l’optimisation *fixe* dépend de la forme visée. Le motif de microlentille est mieux reproduit avec l’optimisation *libre* alors que c’est l’optimisation *fixe* qui donne un résultat légèrement meilleur pour le profil de pyramide.

La Tableau 5.5 ci-dessous regroupe les temps de calcul nécessaires aux différentes optimisations réalisées précédemment

TABLE 5.5 – Temps de calcul de l’optimisation de masque avec l’image aérienne et avec le modèle complet.

	Maillage	<i>Fixe</i>		<i>Libre</i>	
		Image aérienne	Complet	Image aérienne	Complet
Microlentille	65-65-32	17s	50s	69s	385s
Pyramide	56-56-64	19s	101s	90s	248s

L’analyse des temps de calcul confirme l’intérêt de l’optimisation en deux étapes. L’optimisation du masque à partir de l’image aérienne est un processus rapide qui permet d’obtenir un masque intermédiaire proche de celui recherché. Le temps de calcul nécessaire à optimiser ce masque en utilisant le modèle complet est beaucoup plus important.

Une dernière remarque concerne le nombre d’itérations d’optimisation pour lesquelles le critère r_{MRC} a été supérieur à 1 (étape 1 et 2 confondues). Pour l’optimisation de la microlentille

5 itérations ont enfreint le critère de minSPACE sur un total de 191 itérations. Pour la pyramide ce nombre s'élève à 4 (pour le même nombre d'itérations totales). L'optimiseur ne semble donc pas avoir nécessairement besoin d'enfreindre régulièrement la règle de minSPACE pour réussir sa convergence.

5.6 Création d'un nouveau masque grayscale optimisé

À partir des algorithmes décrits jusqu'à présent, la création d'un nouveau masque grayscale a été réalisée. Ce nouveau masque, dénommé ORCA, a bénéficié à la fois de l'expérience accumulée d'un point de vue théorique (algorithmes d'optimisation de masque, modélisation du comportement de la résine) mais également pratique (agencement des pixellisations sur le masque, regroupements pour faciliter les mesures...).

Le nombre de pixellisations et de configurations intégrées sur ORCA est beaucoup plus important que sur FISH utilisé pour la calibration. Les algorithmes présentés jusqu'à présent ont été utilisés à grande échelle pour générer plusieurs centaines de pixellisations différentes explorant une grande variété de motifs : microlentilles, microlentilles décentrées, microlentilles inversées, microlentilles en configuration SPD/LPD, ellipses, cônes, pyramides, escaliers, rampes... Afin d'évaluer l'impact de la dose sur la préparation du masque, chaque cible résine a fait l'objet d'une optimisation de masque pour trois doses différentes : 1300J/m^2 , 1500J/m^2 et 1700J/m^2 . Tous les éléments sur le masque sont matricés. Par conséquent, c'est la période de matriçage qui renseigne sur la nature isolée ou dense des profils considérés.

Cette section correspond donc à l'aboutissement du travail de thèse. Elle vise à statuer sur les capacités de la lithographie grayscale associée à l'approche d'optimisation de masque décrite précédemment. Dans un premier temps, les changements de procédé intervenus au cours de la thèse au moment de l'exploitation d'ORCA seront introduits. Enfin, une partie des profils expérimentaux obtenus avec ORCA seront illustrés et comparés aux profils simulés et cibles. Ces résultats permettront donc de conclure sur les capacités de l'approche grayscale pour réaliser des formes 3D en résine de petites dimensions dans la gamme d'échelle qui nous intéresse ($1\mu\text{m}$ à $3\mu\text{m}$).

5.6.1 Évolution des conditions de procédé

Entre la création d'ORCA, sa réception et les premières expositions certains changements concernant les conditions de procédé sont intervenus :

- **Changement de dilution de la résine B**

La nature des composants n'a pas évolué. Cependant la quantité relative de solvant dans la résine a augmenté. En pratique, cette différence de composition n'est pas problématique puisqu'un simple ajustement de la dose permet de contrebalancer ce changement dans le cas d'une lithographie classique. Il est difficile de juger de son impact dans le cadre de la lithographie grayscale.

Ce changement de dilution de résine n'était pas souhaité dans le cadre de la thèse. Bien évidemment, il aurait fallu conserver la même dilution tout au long des 3 années de thèse. Cependant, les échelles de temps au niveau des fournisseurs de résine sont différentes. Le fabricant ne peut pas garantir d'être en mesure de reproduire une certaine résine plusieurs mois après la livraison des premiers échantillons.

- **Méthode d'étalement de la résine B**

Pour les plaques exposées avec FISH l'étalement de résine était réalisé de manière semi-manuelle avec un dispositif de type *small dispense*². À présent, l'étalement est réalisé à l'aide d'un équipement automatisé.

2. Il s'agit d'une seringue remplie manuellement puis installée dans une ligne de distribution.

Une campagne de métrologie importante a été réalisée en amont des premières expositions avec ORCA afin de disposer de tous les éléments caractéristiques de l'empilement. Les mesures suivantes ont été réalisées :

1. **Courbe d'étalement de la résine B sur silicium** : l'étalement de la résine a été mesuré à nouveau sur silicium avec l'étalement en automatique. La courbe obtenue est identique à celle mesurée en *small-dispense*, à un décalage vertical prêt : il est nécessaire d'étaler plus rapidement qu'en étalement manuel pour obtenir la même épaisseur de résine. On note la présence d'un effet *nozzle* : l'épaisseur de résine est faible au centre de la plaque, puis augmente le long du rayon vers la périphérie. Ceci est dû à la rotation de la plaque lors de l'étalement de la résine.
2. **Courbe d'étalement de la résine B sur résine B durcie** : l'étalement de résine sur résine B durcie présente des caractéristiques différentes que pour l'étalement sur silicium. L'effet *nozzle* est beaucoup plus marqué avec des écarts entre 70 à 90nm entre l'épaisseur étalée au centre et en bord de plaque. L'exploitation des scans AFM devra donc prendre en compte ces inhomogénéités si des puces sont mesurées en bord de plaque.
3. **Courbe de réflectivité** : la réflectivité de l'empilement a été mesurée pour information. La réflectivité de l'empilement à angle d'incidence nul est égale à 25%.
4. **Dark-érosion** : la dark-érosion a été mesurée à 3.3nm/s pour la nouvelle composition de la résine B. Pour rappel cette valeur correspond à la vitesse à laquelle les zones non exposées de la résine sont développées. Pour 60s de développement, l'épaisseur de résine retirée est donc de 200nm contre 150nm pour l'ancienne dilution de résine.

Les résultats de cette étude sont disponibles dans un rapport interne [Chevalier, 2020].

5.6.2 Profils expérimentaux

Dans cette section, plusieurs profils expérimentaux issus de l'exposition d'ORCA sont présentés. Les profils ont été mesurés en AFM ainsi qu'en SEM d'observation. Les premiers profils correspondent aux motifs de microlentille et de pyramide décrits dans les sections précédentes. D'autres motifs intégrés sur ORCA seront également étudiés. Nous chercherons à évaluer l'impact de la stratégie d'optimisation *fixe* ou *libre* sur la qualité des profils obtenus. L'impact de la dose sur l'optimisation du masque sera également étudié pour l'optimisation *libre*.

Pour rappel ORCA est divisé en 3 zones correspondant à des valeurs de doses distinctes. Les résultats présentés à une dose donnée sont donc extraits de la portion du masque à la dose correspondante.

Concernant la méthodologie de mesure en AFM, 5 scans sont utilisés pour chaque motif. Ces scans sont réalisés sur la puce centrale du substrat ainsi que ses quatre voisines directes (horizontales et verticales). Les puces étant suffisamment proches sur la plaque, les différences de hauteur de résine liées à l'étalement seront négligées. Le profil expérimental moyen des 5 puces sera tracé ainsi que l'enveloppe globale représentant les 5 profils. Plus cette enveloppe est fine, plus les profils sont proches et inversement. L'intérêt de mesurer 5 puces est statistique.

Insistons à nouveau sur le temps nécessaire à effectuer des mesures en AFM. Une vingtaine de motifs a été mesurée, à 3 doses différentes, en optimisation fixe et libre avec à chaque fois 5 scans. La campagne de mesure en AFM a duré plus de 160h.

Microlentille

La Figure 5.19 ci-dessous représente une vue 3D des scans AFM réalisés sur la puce centrale pour le motif de microlentille en optimisation *fixe* 5.19a et en optimisation *libre* 5.19b dont les masques ont été définis sur la Figure 5.15 page 122.

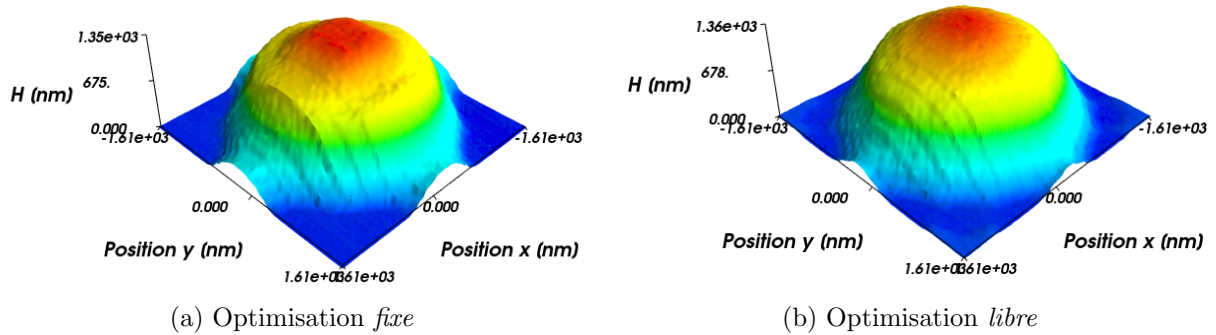


FIGURE 5.19 – Vue 3D des scans AFM du motif de microlentille en optimisation *fixe* et *libre*.

La première observation est la plus simple : les profils obtenus ressemblent bien à des microlentilles. L’optimisation *libre* semble donner de meilleurs résultats notamment au niveau du sommet de la microlentille qui est mieux défini. Pour les deux stratégies d’optimisation les microlentilles se touchent entre elles dans la direction verticale et horizontale.

Afin d’étudier en détail les différences entre les profils, la Figure 5.20 ci-dessous présente les lignes de coupes horizontales et diagonales associées aux scans AFM de la Figure 5.19.

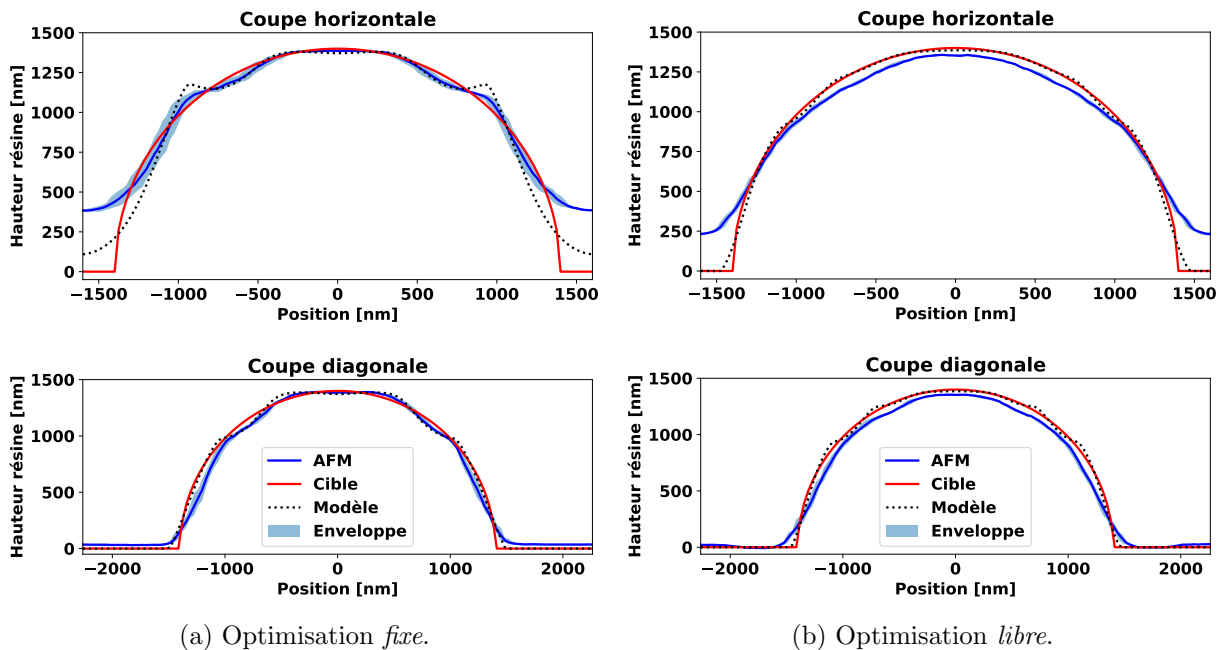


FIGURE 5.20 – Profils expérimentaux, simulés et cibles pour le motif de microlentille en optimisation *fixe* et *libre*.

Les coupes diagonales pour l’optimisation *fixe* et *libre* sont particulièrement fidèles au résultat attendu en simulation. Pour les coupes horizontales, les jonctions avec les microlentilles voisines se réalisent à une altitude plus élevée que celles obtenues en simulation, ce qui confirme l’observation sur la vue 3D. Cette différence peut s’expliquer par l’absence de prise en compte du defocus de l’image aérienne dans l’épaisseur de résine. L’image aérienne perd en contraste à mesure qu’elle se propage et par conséquent n’est plus suffisamment élevée pour retirer la résine dans les zones les plus profondes. La prise en compte de cet effet permettrait d’améliorer la description des motifs. Ces aspects sont discutés en conclusion et en Annexe 7.2.

Il est intéressant de noter que certaines cassures le long des profils expérimentaux étaient prévues par le modèle. L’optimisation *libre* offre une qualité de profil supérieure à l’optimisation

fixe avec moins de ruptures de courbure. La reproductibilité des motifs est assurée : les courbes expérimentales présentent une enveloppe très fine.

Les profils de la microlentille en optimisation *libre* ont été mesurés pour les 3 zones d'ORCA. Pour chacune de ces 3 pixellisations, le profil obtenu avec la dose associée est tracé sur la Figure 5.21 ci-dessous :

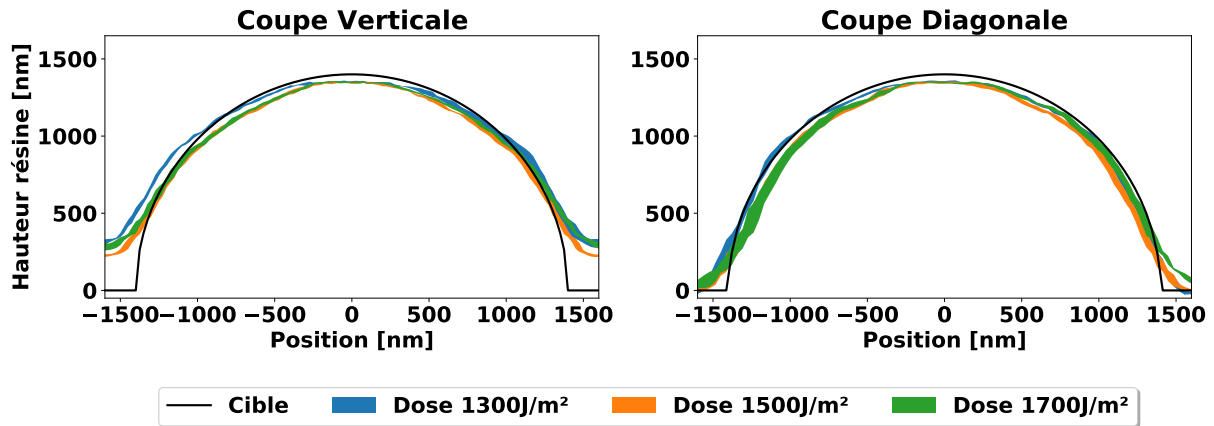


FIGURE 5.21 – Impact de la dose sur le motif de microlentille en optimisation *libre*.

Les trois profils expérimentaux sont très proches. Il n'y a donc pas de valeur de dose plus favorable qu'une autre pour adresser le motif de microlentille lors de l'optimisation du masque avec la stratégie *libre*.

Enfin, la Figure 5.22 ci-dessous présente deux images réalisées avec le SEM d'observation d'une matrice de microlentilles obtenue en optimisation *libre* pour une dose de 1500J/m^2 .

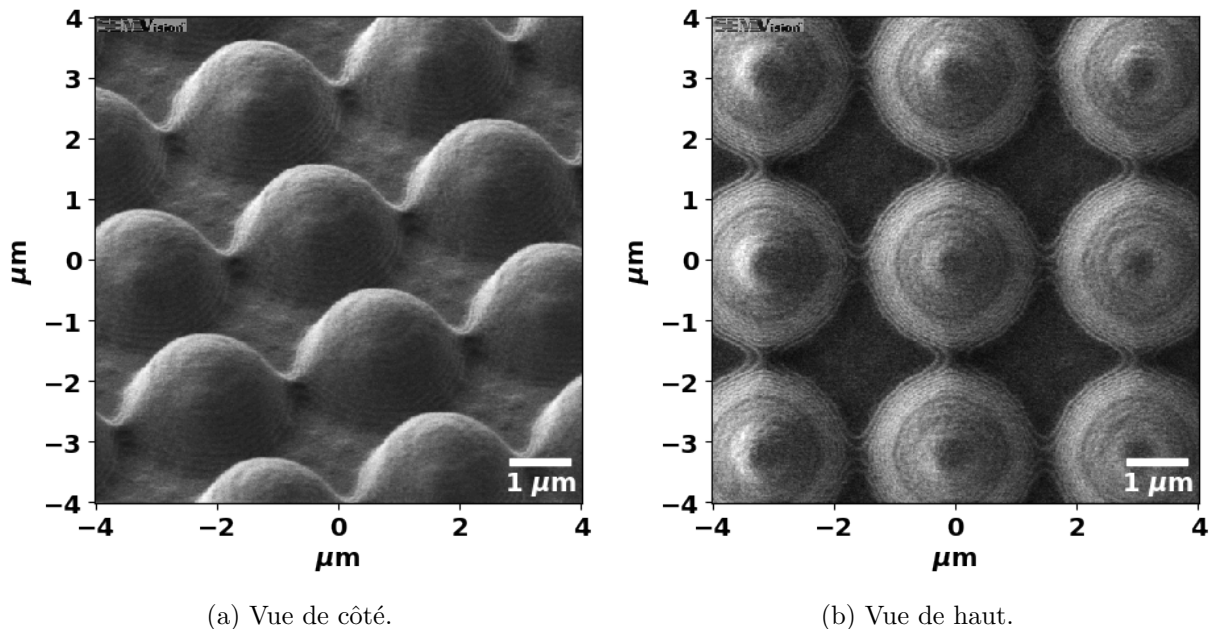


FIGURE 5.22 – Images SEM d'une portion de matrice de microlentilles obtenue en optimisation *libre*.

La présence d'ondes stationnaires est clairement visible sur l'image SEM de droite (en moindre mesure sur celui de gauche). Le phénomène s'apparente à des lignes d'altitude. Cet

angle de vue permet également de confirmer l'observation réalisée en AFM de «pontage» entre les voisins. La vue de dessus permet également de confirmer que l'empreinte des microlentilles est bien circulaire.

Pyramide

La Figure 5.23 ci-dessous représente une vue 3D des scans AFM réalisés sur la puce centrale pour le motif de pyramide en optimisation *libre* et *fixe* dont les masques ont été présentés sur la Figure 5.17 page 123.

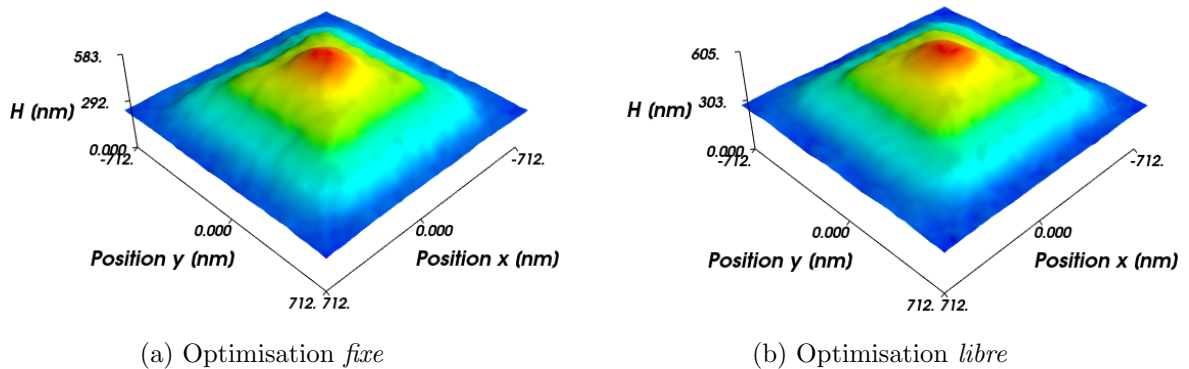


FIGURE 5.23 – Vue 3D des scans AFM du motif de pyramide en optimisation *fixe* et *libre*.

Il est assez difficile d'analyser les différences entre les deux scans puisque la hauteur des pyramides est faible. Cependant, les profils obtenus semblent s'apparenter à la géométrie visée.

La Figure 5.24 ci-dessous présente les lignes de coupes horizontales et diagonales associées aux scans AFM :

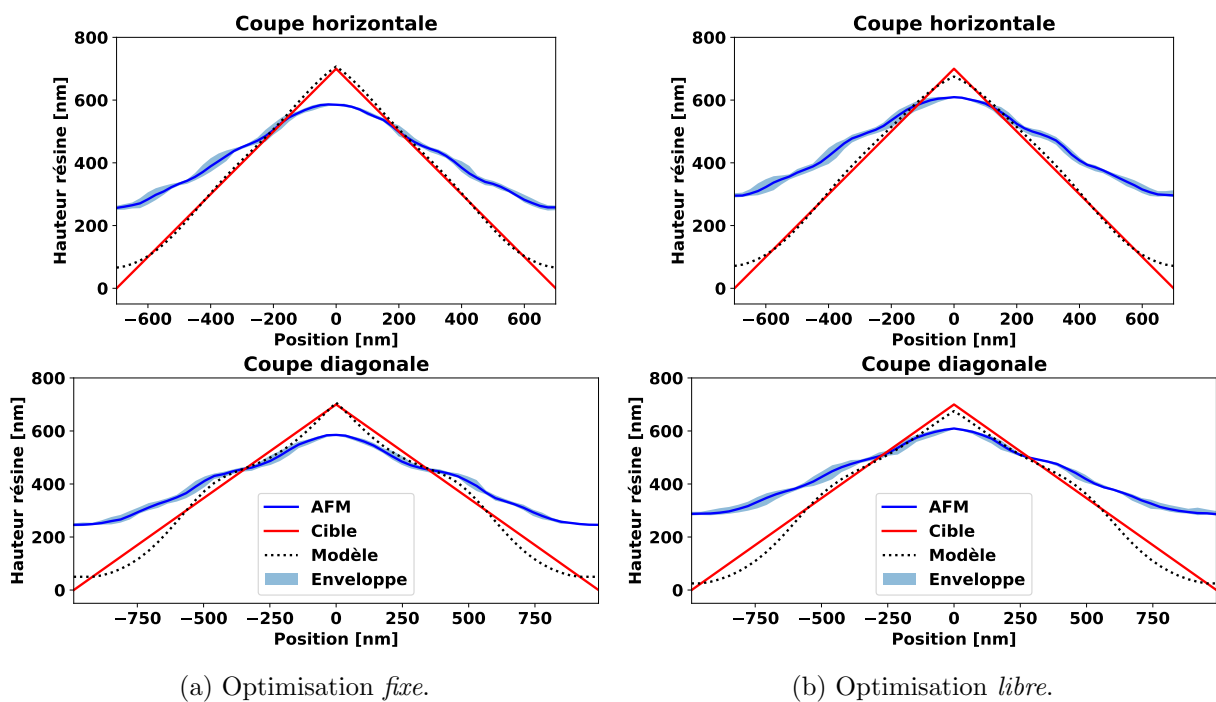


FIGURE 5.24 – Profils expérimentaux, simulés et cibles pour le motif de pyramide en optimisation *fixe* et *libre*.

Le résultat entre optimisation *fixe* et *libre* est sensiblement identique. La hauteur du profil

expérimental est proche de celle attendue. Cependant, la pente des faces de la pyramide est plus faible que celle attendue. En outre, la jonction avec les voisins se réalise à une hauteur trop importante quel que soit la direction de coupe. L'absence de defocus est à nouveau l'explication privilégiée puisque ce motif est défini sur les couches les plus profondes de la résine qui sont les plus sensibles aux effets du defocus (annexe 7.2). Concernant la reproductibilité des résultats, cette dernière reste bonne.

Une autre explication possible à cet écart est l'absence de motifs «enterrés» dans les groupes de profils utilisés pour la calibration du modèle de développement au chapitre précédent. Les phénomènes physiques mis en jeu lors de l'étape d'exposition et de développement pour de telles structures sont probablement différents de ceux s'appliquant aux structures définies sur la totalité de l'épaisseur de la résine. En incluant de tels profils à la calibration du modèle de développement un jeu de paramètres différent aurait été obtenu, décrivant mieux l'ensemble des profils observés.

Les profils de la pyramide en optimisation *libre* ont été mesurés pour les 3 zones d'ORCA. Pour ces 3 pixellisations le profil obtenu avec la dose associée est tracé sur la Figure 5.25 ci-dessous :

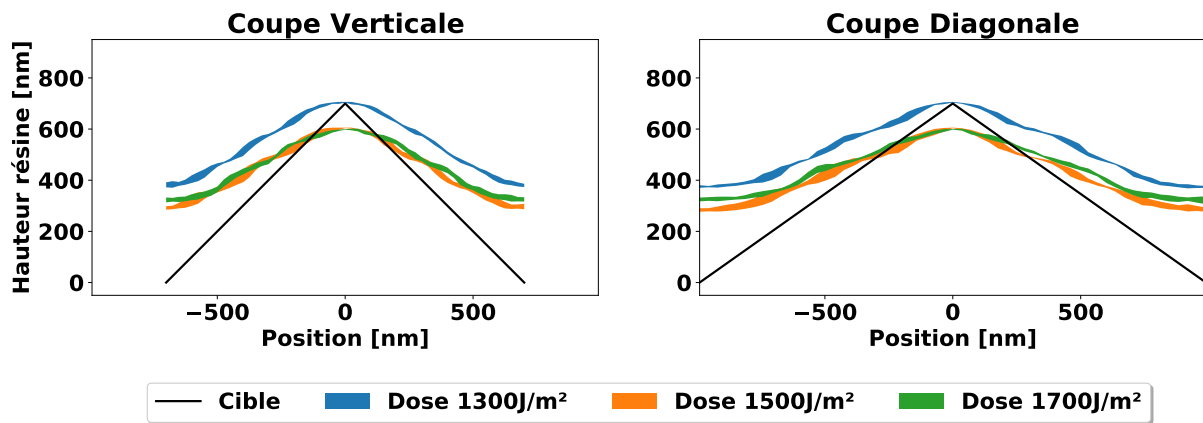


FIGURE 5.25 – Impact de la dose sur le motif de pyramide en optimisation *libre*.

Les profils obtenus avec les doses 1500J/m² et 1700J/m² sont très proches. Le profil à 1300J/m² présente la même forme, mais à environ 100nm plus haut. La dose ne permet pas d'obtenir une meilleure pente pour les faces de la pyramide. Les résultats expérimentaux sont ici éloignés de ceux attendus en simulation.

La Figure 5.26 ci-contre présente une image SEM d'une pyramide obtenue en optimisation *libre* à 1500J/m².

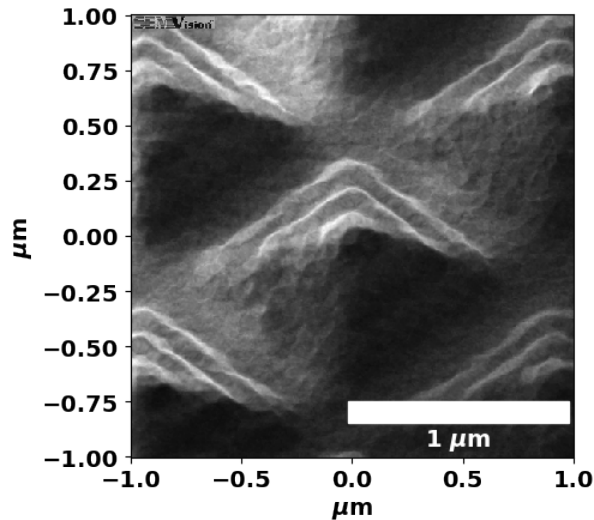


FIGURE 5.26 – Image SEM du motif de pyramide «enterré» obtenue en optimisation *libre*.

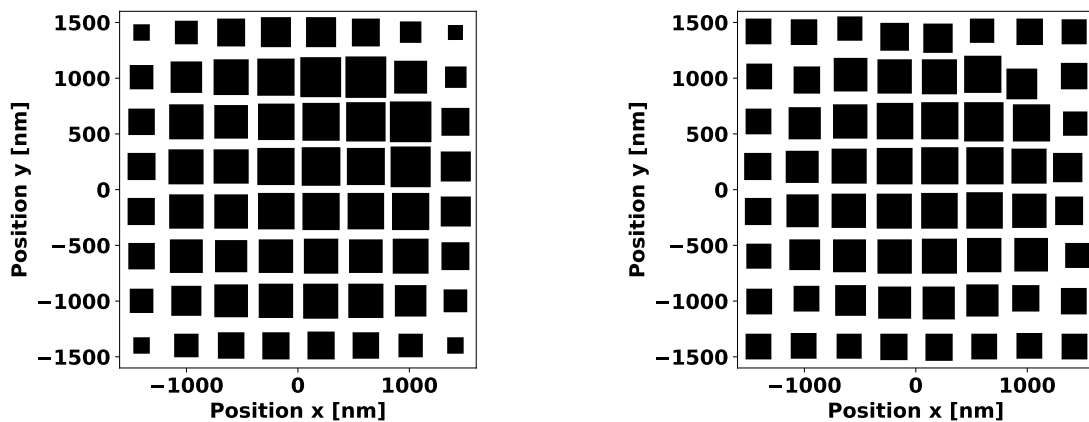
Cette visualisation permet de mieux appréhender la géométrie de la structure. La pyramide possède une architecture de type maya à 3 étages. La séparation en étages étant probablement la conséquence de la formation d’ondes stationnaires.

Microlentilles hors-axe

La microlentille hors-axe est une microlentille dont le sommet a été décalé du centre de gravité. Ce type de microlentille permet de compenser certains angles d’illumination dans des dispositifs optiques. L’optimisation pour ce motif est particulièrement longue puisqu’elle contient une symétrie à 45° qui n’est pas implémentée dans le cadre de la thèse. Tous les plots de chrome doivent donc être optimisés indépendamment.

La microlentille hors-axe présentée ici possède un rayon de 1400nm et un sommet décalé de 700nm en x et en y vers le côté supérieur droit. Le motif est considéré isolé puisque sa période est de 3200nm (400nm d’espace entre voisins).

La Figure 5.27 ci-dessous présente les masques obtenus en optimisation *fixe* (5.27a) avec $N_{plots} = 8$ et en optimisation *libre* (5.27b) avec $N_{plots} = 9$ pour une dose de $1500\text{J}/\text{m}^2$.

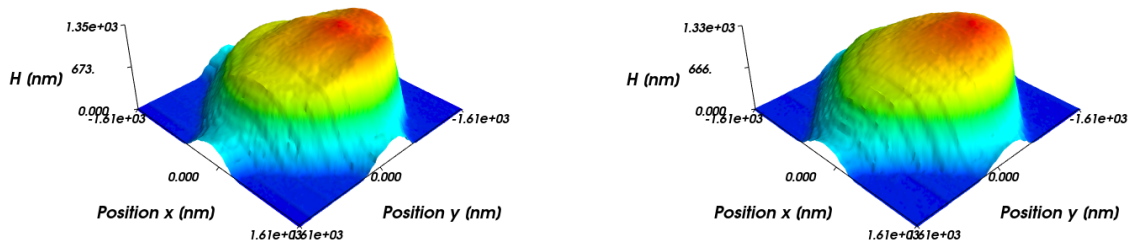


(a) Optimisation *fixe* avec $N_{plots} = 8$

(b) Optimisation *libre* avec $N_{plots} = 9$

FIGURE 5.27 – Masques grayscale optimisés pour le motif de microlentille hors-axe avec optimisation *fixe* et *libre*.

La Figure 5.28 ci-dessous représente une vue 3D des scans AFM réalisés sur la puce centrale avec les masques de la Figure 5.27 exposés à $1500\text{J}/\text{m}^2$:



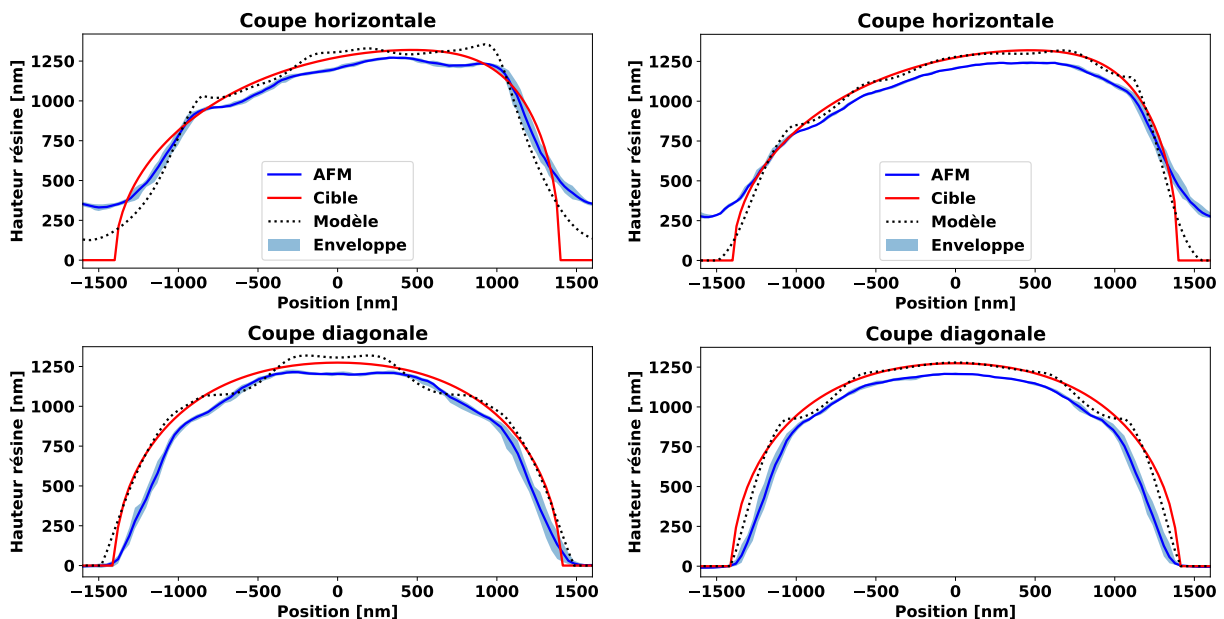
(a) Optimisation *fixe* avec $N_{plots} = 8$

(b) Optimisation *libre* avec $N_{plots} = 9$

FIGURE 5.28 – Vue 3D des scans AFM du motif de microlentille hors-d’axe en optimisation *fixe* et *libre*.

Dans les deux cas le motif est ponté avec ses voisins dans la direction verticale et horizontale. Le sommet de la microstructure semble mieux défini en optimisation *libre*.

La Figure 5.29 ci-dessous présente les lignes de coupes horizontales et diagonales associées aux scans AFM de la Figure 5.28.



(a) Optimisation *fixe* avec $N_{plots} = 8$.

(b) Optimisation *libre* avec $N_{plots} = 9$.

FIGURE 5.29 – Profils expérimentaux, simulés et cibles pour le motif de microlentille hors-d’axe en optimisation *fixe* et *libre*.

Pour les deux stratégies d’optimisation le profil résine est légèrement plus petit que celui attendu. À nouveau, les profils présentent une jonction avec les voisins dans la direction horizontale plus élevée que celle simulée (effet du defocus). Les motifs ne sont donc pas réellement isolés. On note toutefois l’apport de l’optimisation *libre* qui permet de bien mieux lisser la surface obtenue.

Les profils de la microlentille hors-d’axe en optimisation *libre* ont été mesurés pour les 3 zones d’ORCA. Pour ces 3 pixellisations le profil obtenu avec la dose associée est tracé sur la

Figure 5.30 ci-dessous :

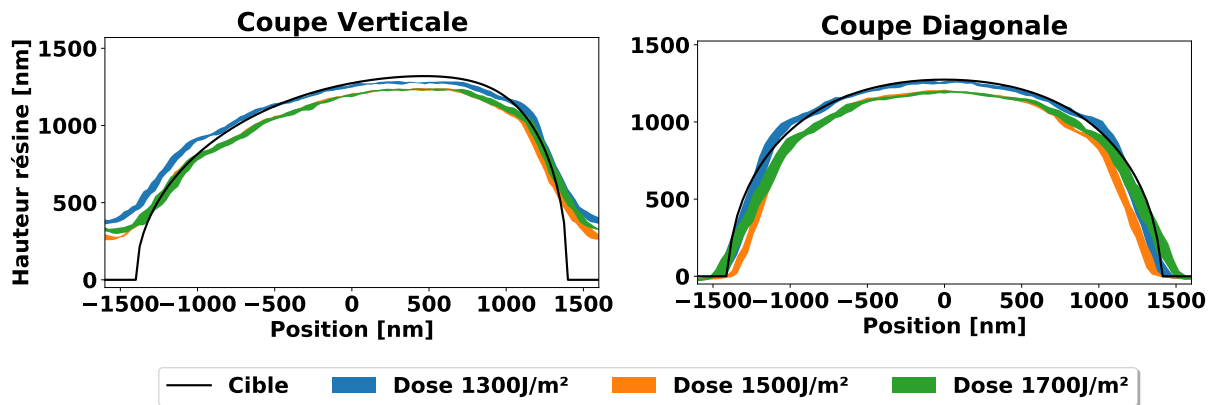
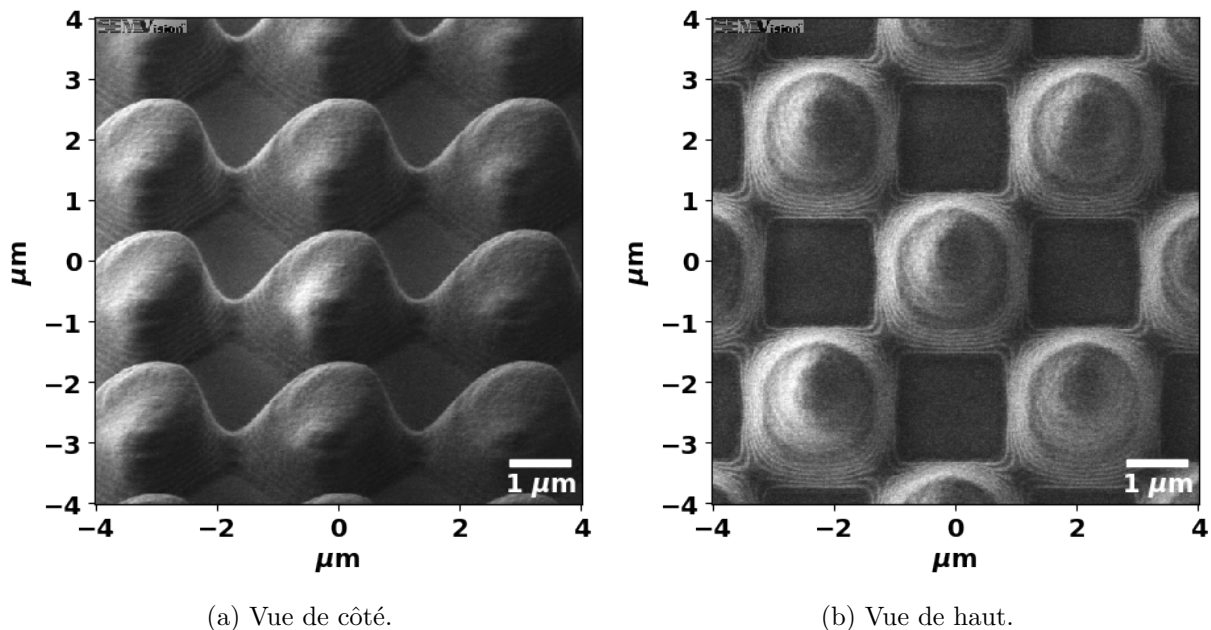


FIGURE 5.30 – Impact de la dose sur le motif de microlentille hors-d'axe en optimisation *libre*.

Le constat est identique à celui de la pyramide enterrée : les profils obtenus avec les doses $1500\text{J}/\text{m}^2$ et $1700\text{J}/\text{m}^2$ sont très proches. Le profil à $1300\text{J}/\text{m}^2$ est celui qui décrit le mieux le profil cible.

La Figure 5.31 ci-dessous présente deux images réalisées avec le SEM d'observation d'une matrice de microlentilles hors-d'axe obtenue en optimisation *libre* à $1500\text{J}/\text{m}^2$.



(a) Vue de côté.

(b) Vue de haut.

FIGURE 5.31 – Images SEM d'une portion de matrice du motif de microlentille hors-d'axe obtenue en optimisation *libre*.

Ces images permettent de mieux appréhender la forme de la structure obtenue. À nouveau la présence d'ondes stationnaires est visible sur l'image SEM de droite. Le décalage du sommet de la microlentille est bien visible. Cependant, la proximité des voisins entraîne un pontage entre les microlentilles à une épaisseur de résine non nulle.

Ellipse

Le motif en ellipse est défini par les rayons du petit et du grand axe respectivement de 1400nm et 4200nm. L'optimisation de ce type de motif est réalisée sans prise en compte des symétries, malgré la présence de deux symétries miroirs. Le masque étant carré la périodicité en x et y est identique et égale à 4200nm. Par conséquent, le motif est dense le long de l'axe x et isolé le long de l'axe y .

La Figure 5.32 ci-dessous présente les masques obtenus en optimisation *fixe* 5.32a et en optimisation *libre* 5.32b pour ce motif avec $N_{plots} = 12$ pour une dose de $1500\text{J}/\text{m}^2$.

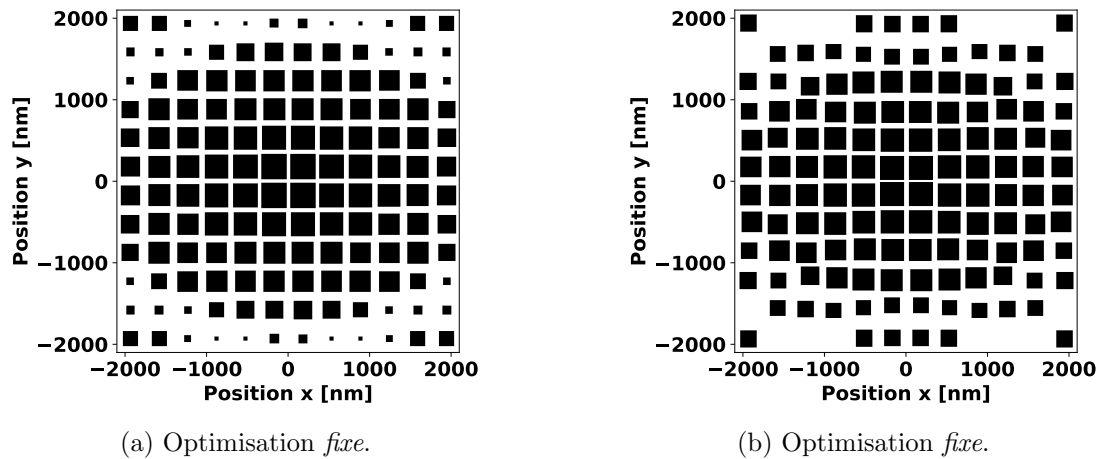


FIGURE 5.32 – Masques grayscale optimisés pour le motif d'ellipse avec optimisation *fixe* et *libre*.

On note que les plus petits plots présents sur le masque en optimisation *fixe* ont été retirés lors de l'optimisation *libre* via l'étape de retrait des plots inutiles. On peut néanmoins douter de la pertinence de garder les quatre plots de chrome situés dans les coins du masque. Une stratégie de retrait des plots de chrome plus poussée aboutirait probablement à leur suppression (nous verrons qu'en pratique l'apport de ces plots est nul sur les profils expérimentaux).

La Figure 5.33 ci-dessous représente une vue 3D des scans AFM réalisés sur la puce centrale avec les masques de la Figure 5.32 exposés à $1500\text{J}/\text{m}^2$.

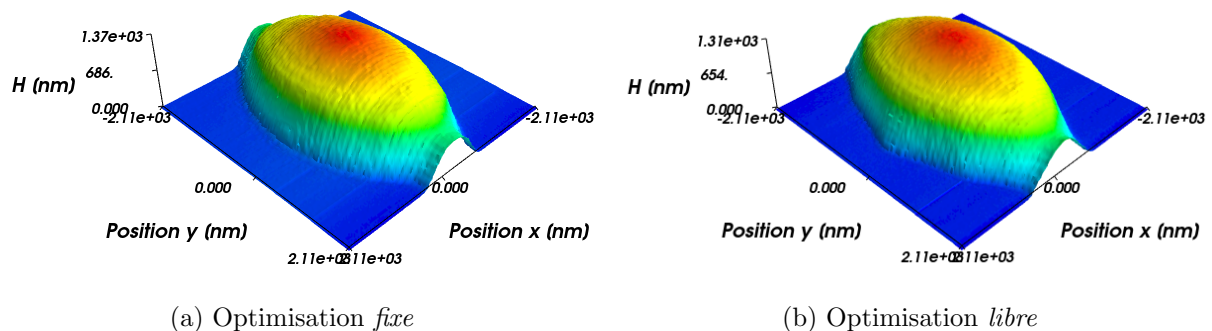


FIGURE 5.33 – Vues 3D des scans AFM du motif d'ellipse en optimisation *fixe* et *libre*.

Les profils obtenus sont globalement similaires, on note que la jonction avec les ellipses voisines se réalise le long du grand axe à une hauteur non nulle. La Figure 5.34 ci-dessous présente les lignes de coupes horizontales et diagonales associées aux scans AFM.

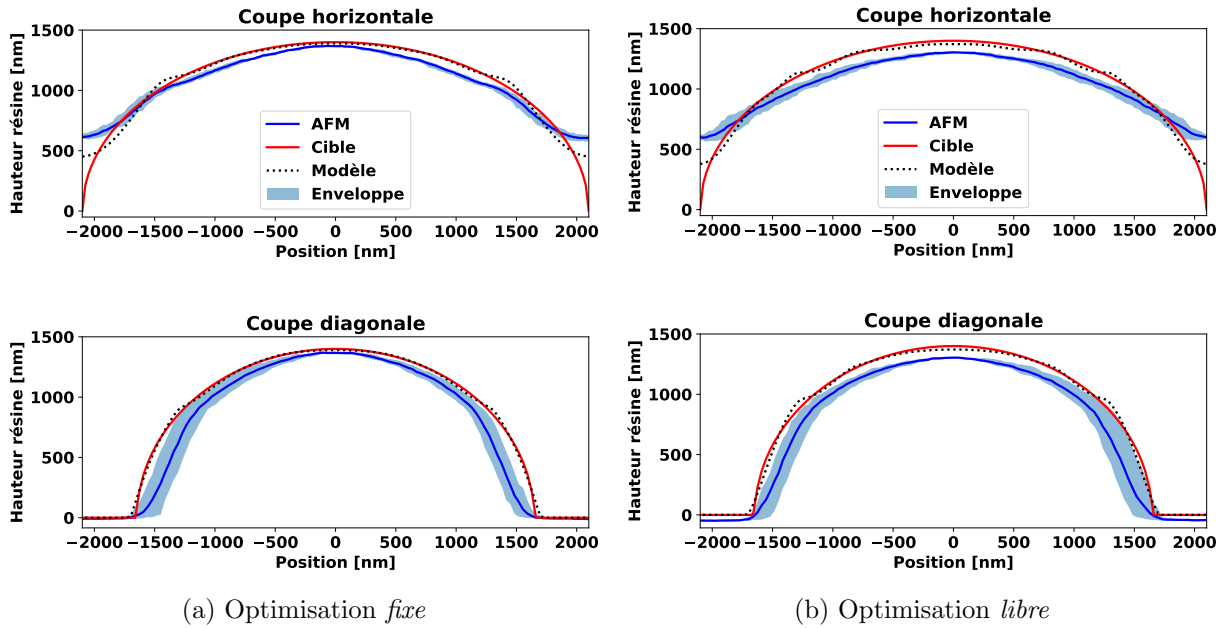


FIGURE 5.34 – Profils expérimentaux, simulés et cibles pour le motif d'ellipse en optimisation *fixe* et *libre*.

Les profils en optimisation *fixe* et *libre* sont particulièrement proches. La courbure horizontale obtenue en optimisation *libre* semble cependant plus en adéquation avec celle recherchée. L'enveloppe expérimentale semble ici plus large sur les coupes diagonales. Cet effet est dû à la procédure de recentrement des scans AFM, moins efficace pour ce motif.

Les profils de l'ellipse en optimisation *libre* ont été mesurés pour les 3 zones d'ORCA. Pour ces 3 pixellisations le profil obtenu avec la dose associée est tracé sur la Figure 5.35 ci-dessous :

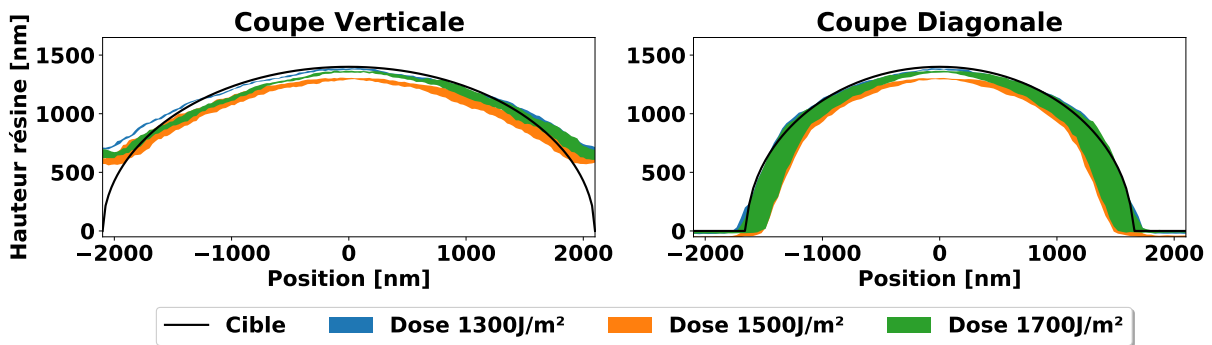
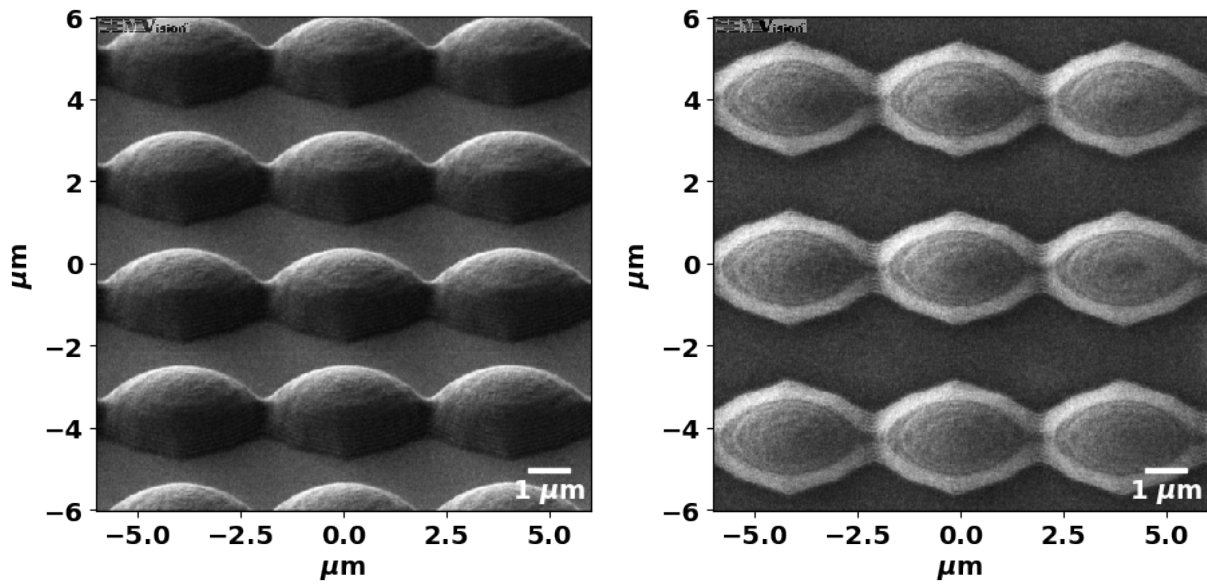


FIGURE 5.35 – Impact de la dose sur le motif d'ellipse en optimisation *libre*.

Pour ce profil les 3 doses aboutissent à des enveloppes différentes. À nouveau c'est à $1300\text{J}/\text{m}^2$ que le motif semble le mieux défini.

La Figure 5.36 ci-dessous présente deux images réalisées avec le SEM d'observation d'une matrice d'ellipses obtenue en optimisation *libre*.



(a) Vue de côté.

(b) Vue de haut.

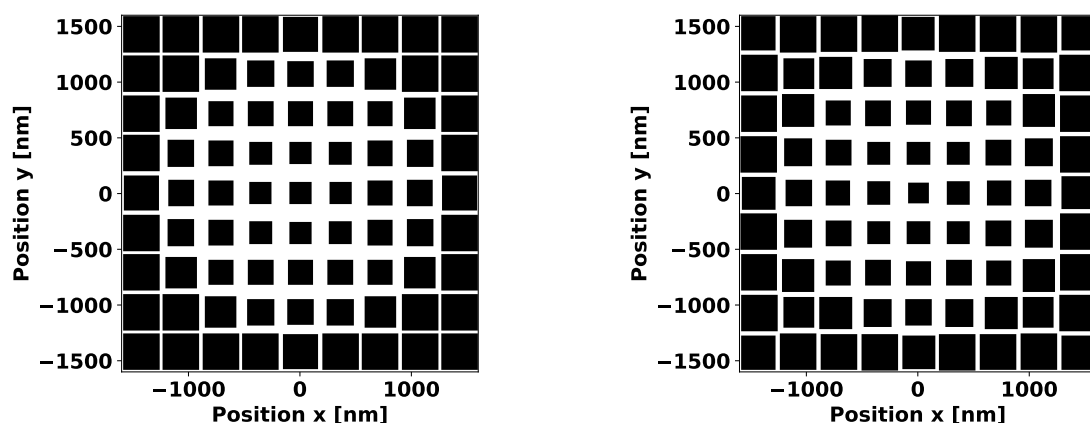
FIGURE 5.36 – Images SEM d’une portion de matrice du motif d’ellipses obtenue en optimisation *libre*.

Les ellipses sont suffisamment éloignées les unes des autres verticalement pour les considérer comme isolées dans cette direction. En revanche, dans la direction horizontale les ellipses sont jointées les unes avec les autres. Les ondes stationnaires sont bien visibles sur la moitié basse des structures.

Microlentille inversée

La microlentille inversée correspond à l’extrusion de résine inverse d’une microlentille de rayon 1400nm. Les configurations isolée (période de 3200nm) et dense (période de 2800nm) seront présentées toute deux dans cet ordre.

La Figure 5.37 ci-dessous présente les masques obtenus en optimisation *fixe* 5.37a et en optimisation *libre* 5.37b avec $N_{plots} = 9$ pour une dose de 1500J/m^2 en configuration isolée :



(a) Optimisation *fixe*.

(b) Optimisation *libre*.

FIGURE 5.37 – Masques grayscale optimisés pour le motif de microlentille inversée avec optimisation *fixe* et *libre* en configuration isolée.

La Figure 5.38 ci-dessous représente une vue 3D des scans AFM réalisés sur la puce centrale pour les masques de la Figure 5.37 :

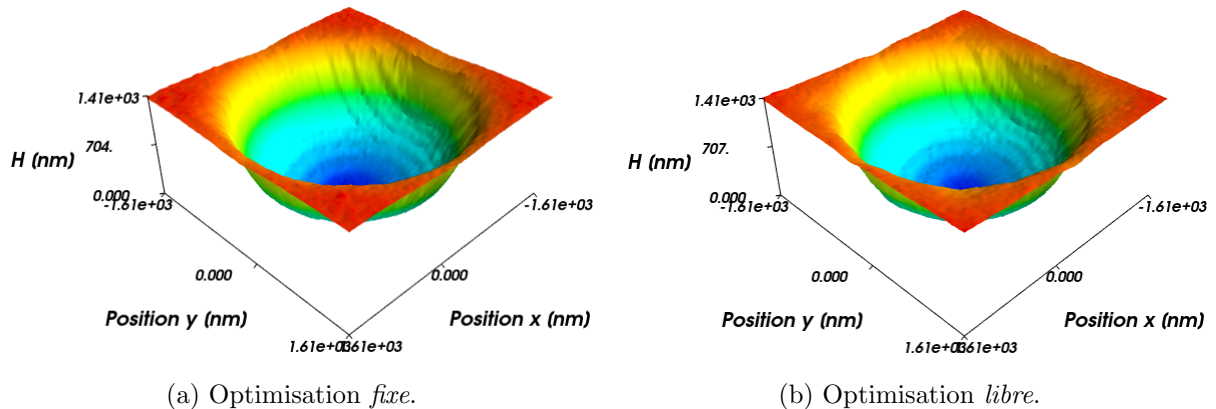


FIGURE 5.38 – Vues 3D des scans AFM du motif de microlentille inversée en optimisation *fixe* et *libre* en configuration isolée.

Il est difficile de distinguer des différences entre le profil *fixe* et *libre*. Ils semblent identiques. La Figure 5.39 ci-dessous présente les lignes de coupes horizontales et diagonales associées aux scans AFM.

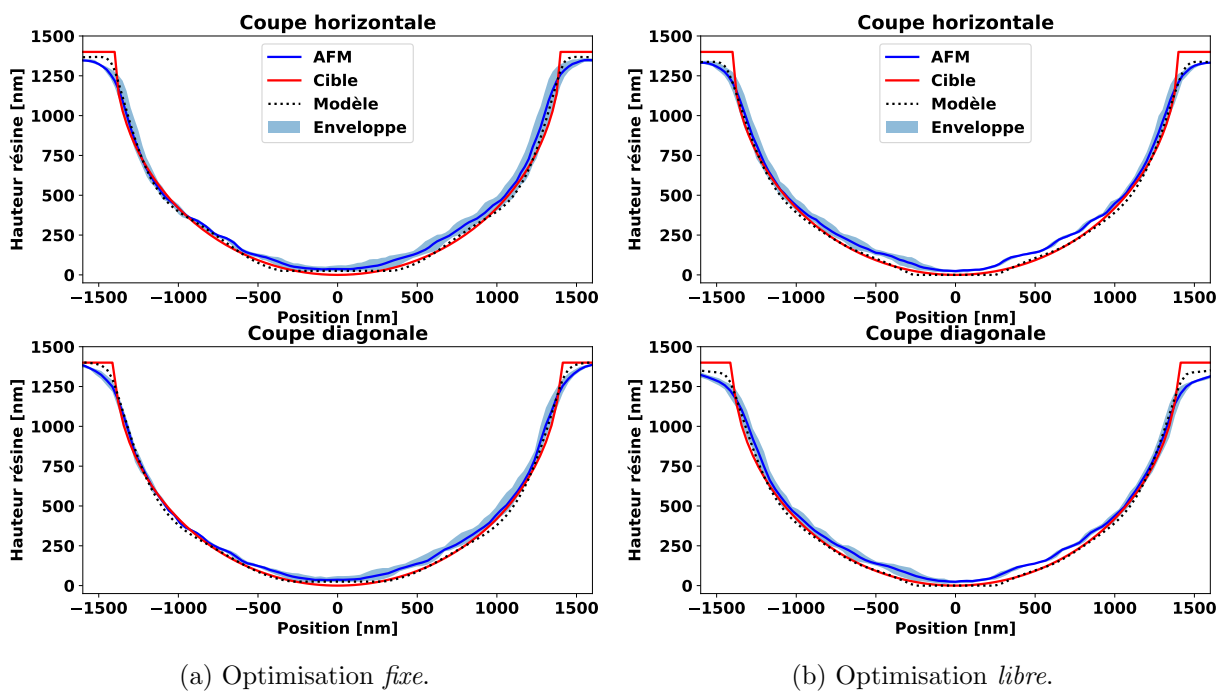


FIGURE 5.39 – Profils expérimentaux, simulés et cibles pour le motif de microlentille inversée en optimisation *fixe* et *libre* en configuration isolée.

La qualité du profil expérimental est ici excellente à la fois en optimisation *fixe* et *libre*. Les profils sont correctement définis pour toutes les valeurs de d'altitude dans la résine.

Les profils de microlentille inversée en optimisation *libre* ont été mesurés pour les 3 zones d'ORCA. Pour ces 3 pixellisations le profil obtenu avec la dose associée est tracé sur la Figure 5.40 ci-dessous :

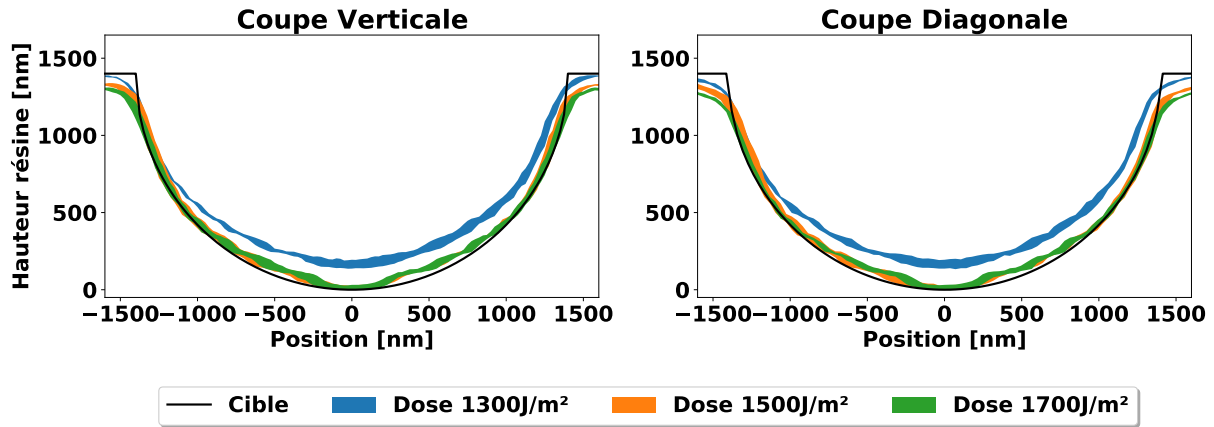


FIGURE 5.40 – Impact de la dose sur le motif de microlentille inversée en optimisation *libre*.

Pour ce motif, la dose à 1300J/m^2 n'est pas assez élevée pour creuser suffisamment la résine. Les profils à 1500J/m^2 et 1700J/m^2 sont équivalents.

La Figure 5.41 ci-dessous présente les masques obtenus en optimisation *fixe* 5.37a et en optimisation *libre* 5.37b avec $N_{plots} = 9$ pour une dose de 1500J/m^2 en configuration dense :

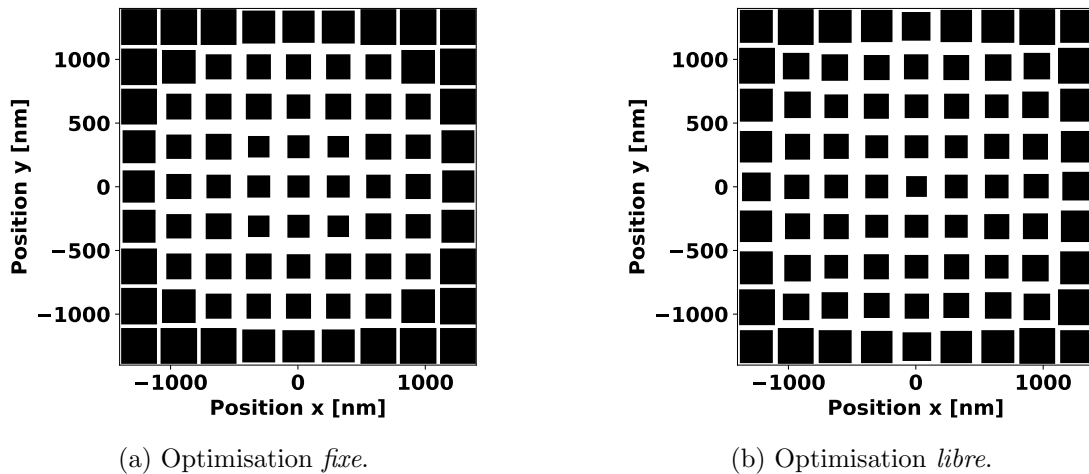


FIGURE 5.41 – Masques grayscale optimisés pour le motif de microlentille inversée avec optimisation *fixe* et *libre* en configuration dense.

La Figure 5.42 ci-dessous représente une vue 3D des scans AFM réalisés sur la puce centrale pour les masques de la Figure 5.41 :

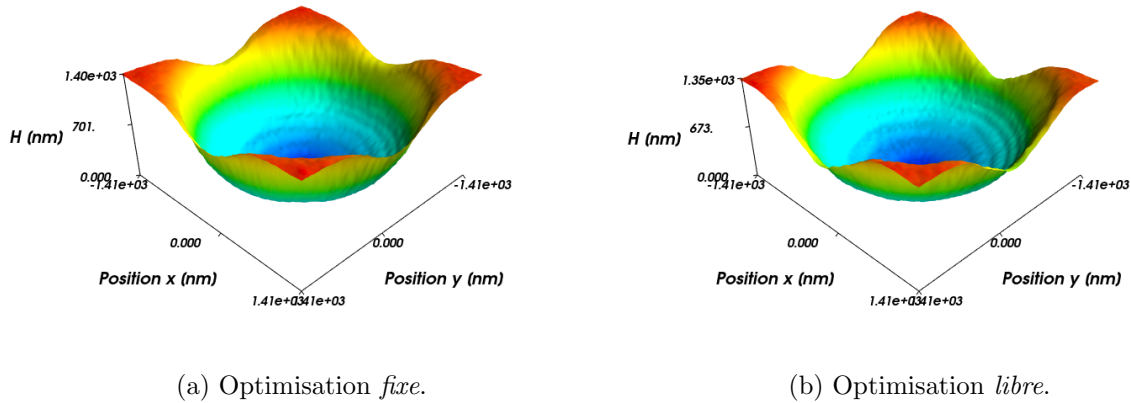


FIGURE 5.42 – Vues 3D des scans AFM du motif de micro-lentille inversée en optimisation *fixe* et *libre* en configuration dense.

Il est à nouveau difficile de distinguer des différences entre le profil *fixe* et *libre*. On peut néanmoins remarquer que la configuration dense impacte les directions horizontales et verticales : la jonction avec les motifs adjacents se réalise plus bas que dans les diagonales.

La Figure 5.43 ci-dessous présente les lignes de coupes horizontales et diagonales associées aux scans AFM de la Figure 5.42.

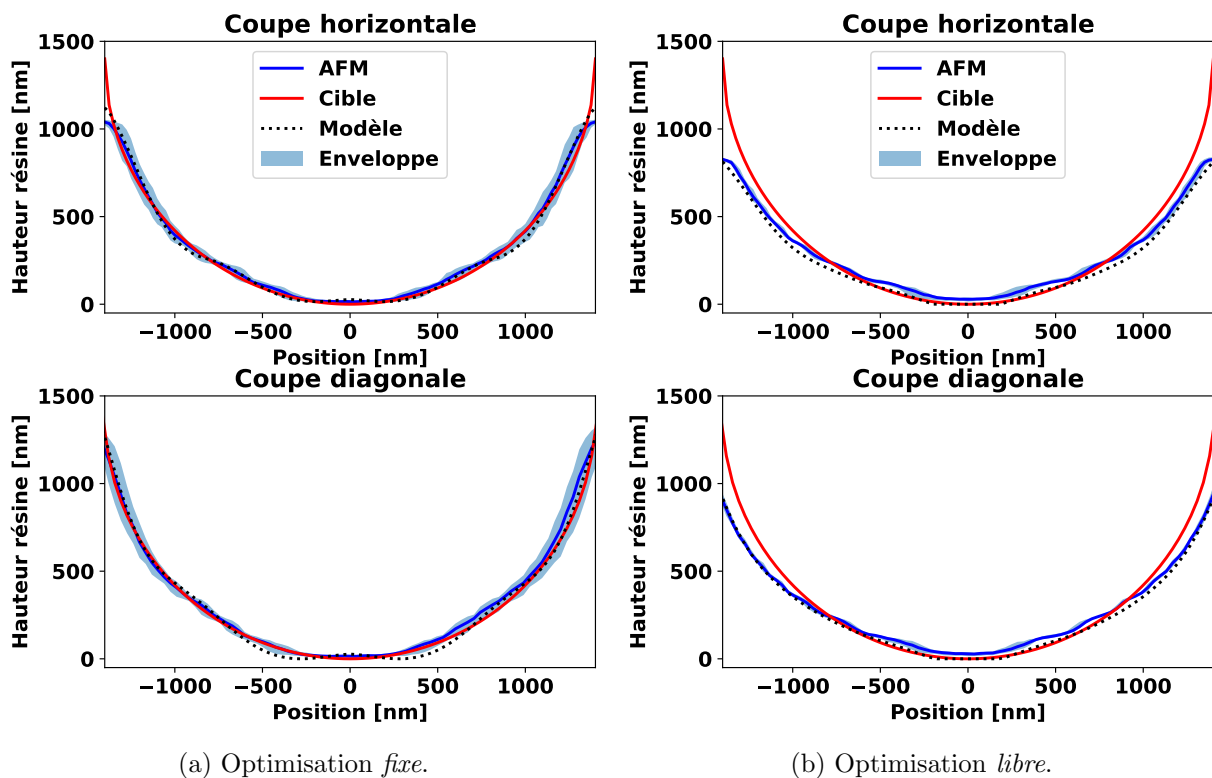
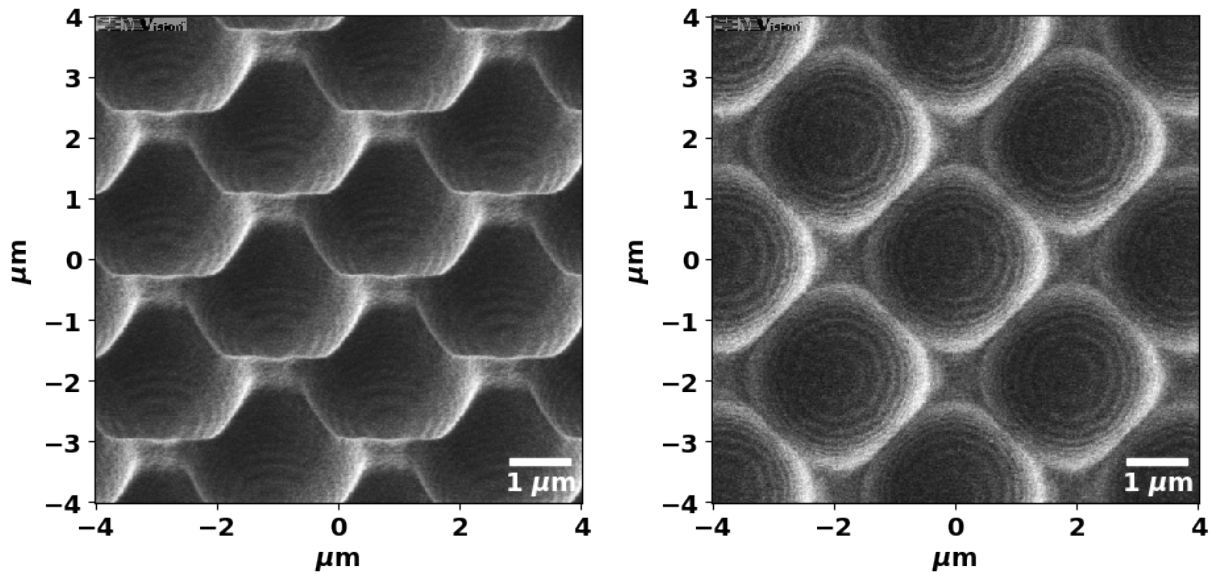


FIGURE 5.43 – Profils expérimentaux, simulés et cibles pour le motif de micro-lentille inversée en optimisation *fixe* et *libre* en configuration dense.

Comme la simulation le prévoyait c'est l'optimisation *fixe* qui présente le meilleur résultat. Il est possible de mettre en doute la qualité de l'optimisation *libre* : on remarque que les quatre plots de chrome situés sur les extrémités verticales et horizontales du masque *libre* (5.41b) sont assez petits en comparaison de ceux du masque *fixe* (5.41a). L'optimiseur aurait du converger vers une taille plus importante ici.

La Figure 5.44 ci-dessous présente deux images réalisées avec le SEM d'observation d'une matrice de microlentilles inversée en configuration dense obtenue en optimisation *libre*.



(a) Vue de côté.

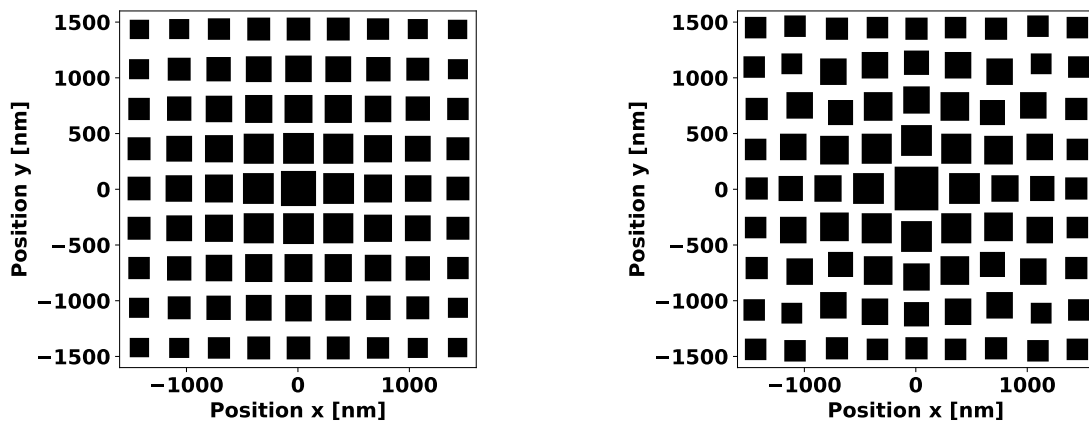
(b) Vue de haut.

FIGURE 5.44 – Images SEM d'une portion de matrice du motif de microlentille inversée obtenue en optimisation *libre*.

On remarque la présence d'oscillations dans la résine témoignant de la présence d'ondes stationnaires. Ces vues permettent de confirmer visuellement la répétabilité des motifs obtenus.

Cône

Le motif de cône intégré est celui d'un cône à base circulaire de rayon 1400nm et de hauteur 1400nm. La période de répétition du motif est de 2800nm ce qui correspond à une configuration dense. La Figure 5.45 ci-dessous présente les masques obtenus en optimisation *fixe* 5.45a et en optimisation *libre* 5.45b pour ce motif avec $N_{plots} = 9$ pour une dose de 1500J/m².



(a) Optimisation *fixe*.

(b) Optimisation *libre*.

FIGURE 5.45 – Masques grayscale optimisés pour le motif de cône avec optimisation *fixe* et *libre*.

La Figure 5.46 ci-dessous représente une vue 3D des scans AFM réalisés sur la puce centrale pour les masques de la Figure 5.45 :

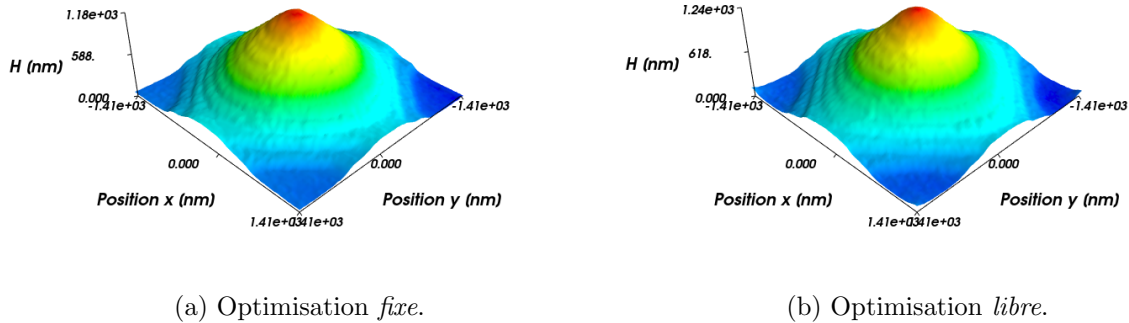


FIGURE 5.46 – Vues 3D des scans AFM du motif de cône en optimisation *fixe* et *libre*.

Les cônes sont bien reconnaissables tout comme la présence d'étages témoignant du phénomène d'ondes stationnaires. Il n'est pas évident d'établir de différences entre le profil obtenu en optimisation *fixe* de celui obtenu en optimisation *libre*.

La Figure 5.39 ci-dessous présente les lignes de coupes horizontales et diagonales associées aux scans de la Figure 5.46 :

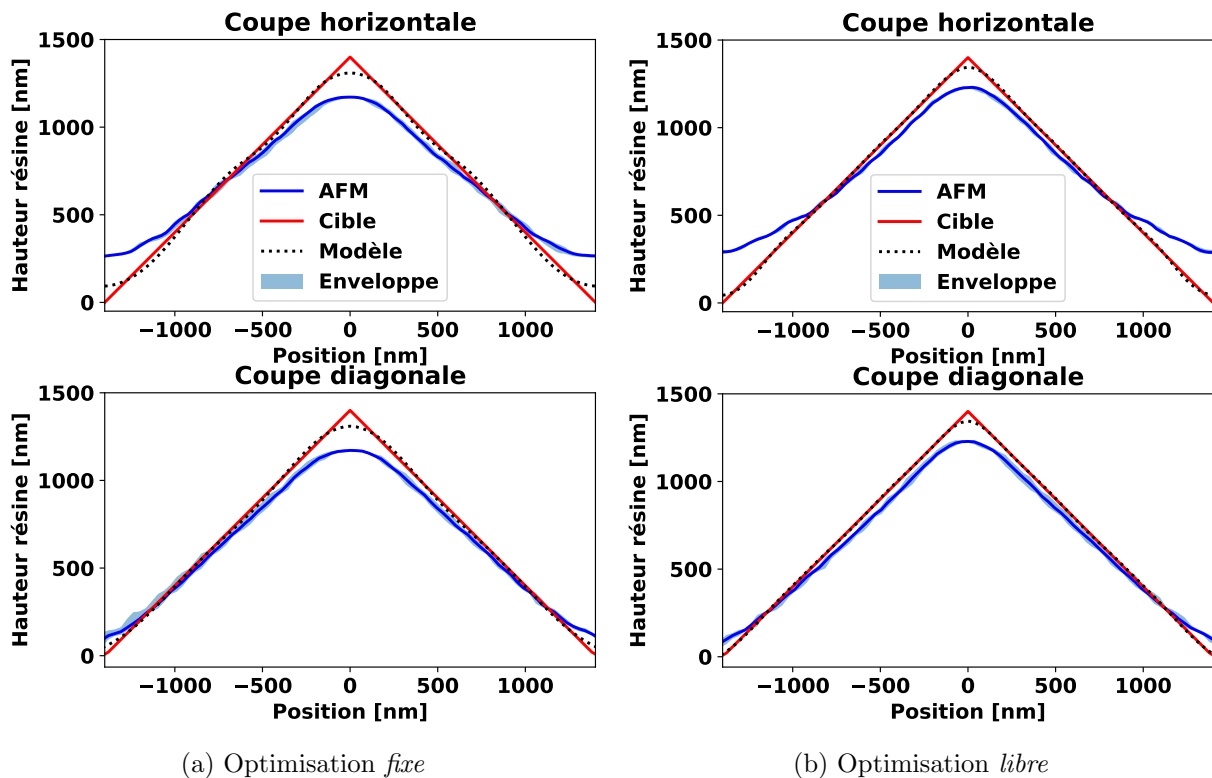


FIGURE 5.47 – Profils expérimentaux, simulés et cibles pour le motif de cône en optimisation *fixe* et *libre*.

Comme pour le cas de la pyramide «enterrée» la différence entre optimisation *fixe* et optimisation *libre* est faible. Dans les deux cas, c'est à nouveau au niveau de la jonction avec les voisins que la pente expérimentale dévie de celle attendue en simulation. Le sommet du cône est

plus bas que celui attendu. Le profil diagonal est très bien défini.

Les profils de cône en optimisation *libre* ont été mesurés pour les 3 zones d'ORCA. Pour ces 3 pixellisations le profil obtenu avec la dose associée est tracé sur la Figure 5.48 ci-dessous :

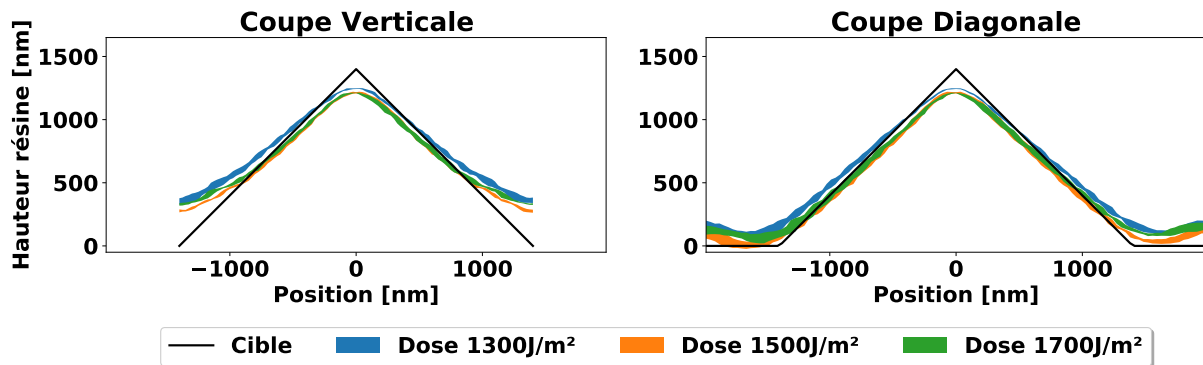


FIGURE 5.48 – Impact de la dose sur le motif de cône en optimisation libre avec $N_{plots} = 9$

Les profils diagonaux sont très proches de ceux attendus. Pour la coupe horizontale aucune dose ne permet d'épouser correctement le pied de motif. On remarque dans la diagonale que la hauteur de résine augmente à nouveau en bord de domaine. Cette observation est confirmée par l'étude des images SEM de la Figure 5.49 ci-dessous.

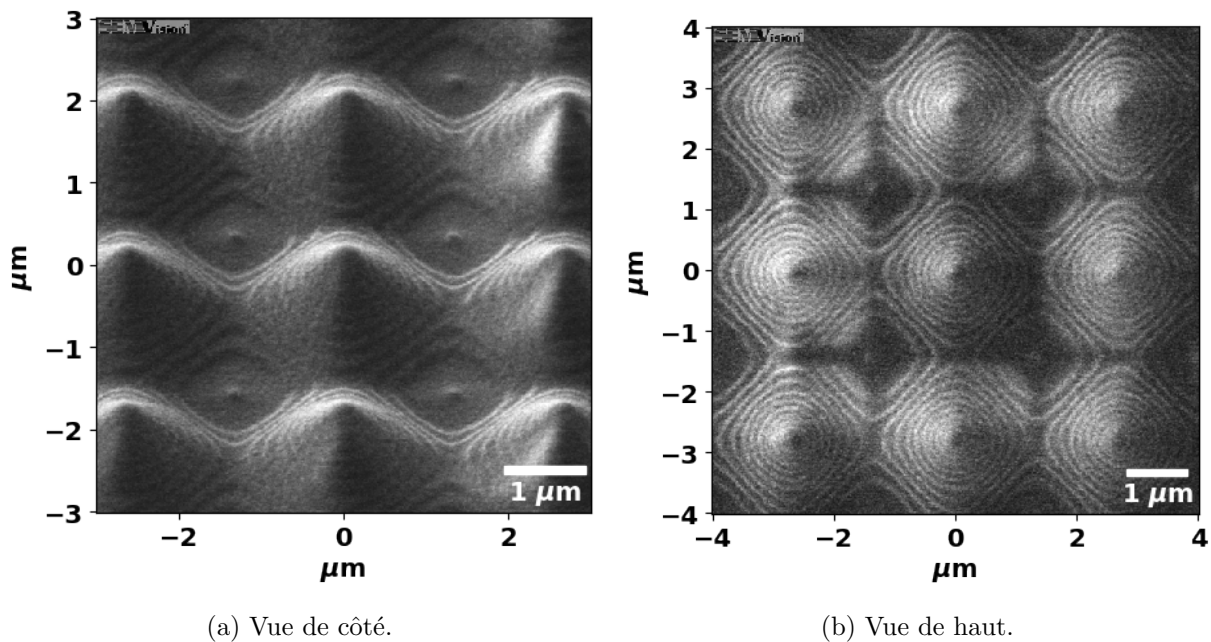


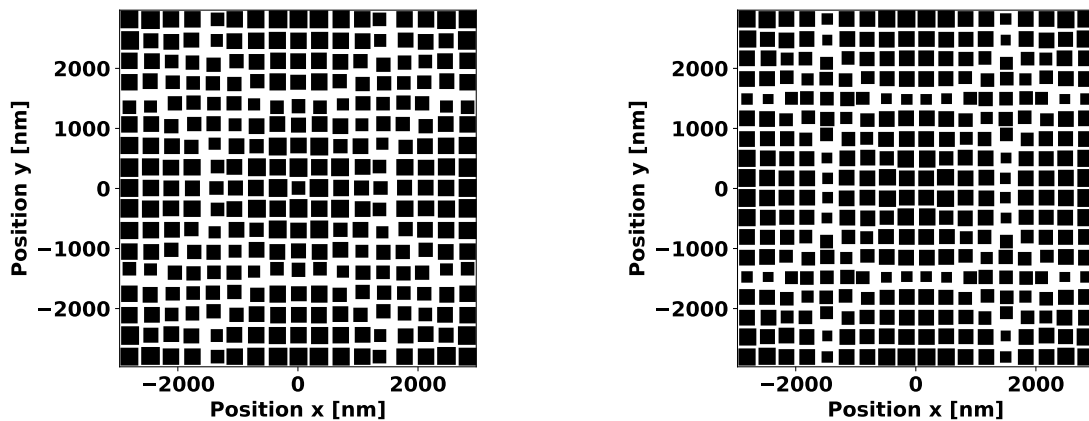
FIGURE 5.49 – Images SEM d'une portion de matrice de cônes obtenue en optimisation *libre*.

En plus des ondes stationnaires, on remarque la présence d'un petit élément de résine situé entre les cônes. Ce résidu de résine est lié aux plots situés dans les coins du masque qui sont en limite de résolution dans la résine. Ces plots auraient du être retirés mais ne l'ont pas été car la simulation ne prévoyait pas leur présence.

SPD/LPD

La dernière microstructure illustrée dans cette section correspond à la configuration SPD/LPD déjà illustrée sur la Figure 2.5 (page 34). Le rayon de la grande microlentille est de 1400nm, celui de la petite est de 700nm. La Figure 5.50 illustre deux masques obtenus pour le motif SPD/LPD en optimisation *libre* avec $N_{plots} = 17$ (5.50a) et $N_{plots} = 18$ (5.50b).

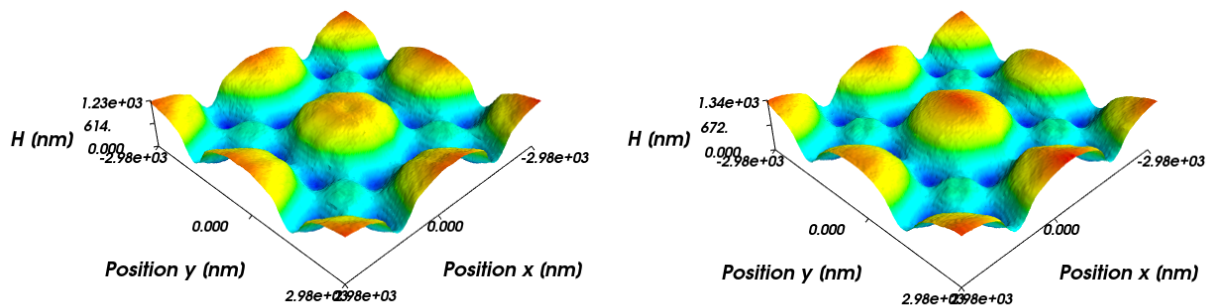
Une erreur a été commise lors de la définition de la fenêtre de simulation pour la création de ces masques. En effet, comme on peut le constater, la taille de la fenêtre définissant le masque est trop importante. En réalité, la fenêtre «élémentaire» permettant l'optimisation de ce motif consiste à prendre en compte la microlentille centrale et un quart des petites microlentilles dans chaque coin. Dans notre cas, la périodicité est certes respectée, mais en prenant en compte deux fois la grande microlentille, l'optimiseur converge donc vers un masque différent entre la grande microlentille centrale et celles sur les bords de la fenêtre.



(a) Optimisation *libre* avec $N_{plots} = 17$. (b) Optimisation *libre* avec $N_{plots} = 18$.

FIGURE 5.50 – Masques grayscale optimisés pour le motif de SPD/LPD en optimisation *libre* avec $N_{plots} = 17$ (5.50a) et $N_{plots} = 18$ (5.50b).

La Figure 5.51 ci-dessous représente une vue 3D des scans AFM réalisés sur la puce centrale pour les masques de la Figure 5.50 :



(a) Optimisation *libre* avec $N_{plots} = 17$ (b) Optimisation *libre* avec $N_{plots} = 18$

FIGURE 5.51 – Vues 3D des scans AFM du motif de SPD/LPD en optimisation *fixe* et *libre*.

On constate que les microlentilles LPD ne présentent pas de profil sphérique mais sont mieux définies que les microlentilles SPD. La jonction entre les SPD et LPD semble également se réaliser trop haut. La Figure 5.52 ci-dessous présente les lignes de coupes horizontales et diagonales associées aux scans de la Figure 5.51 :

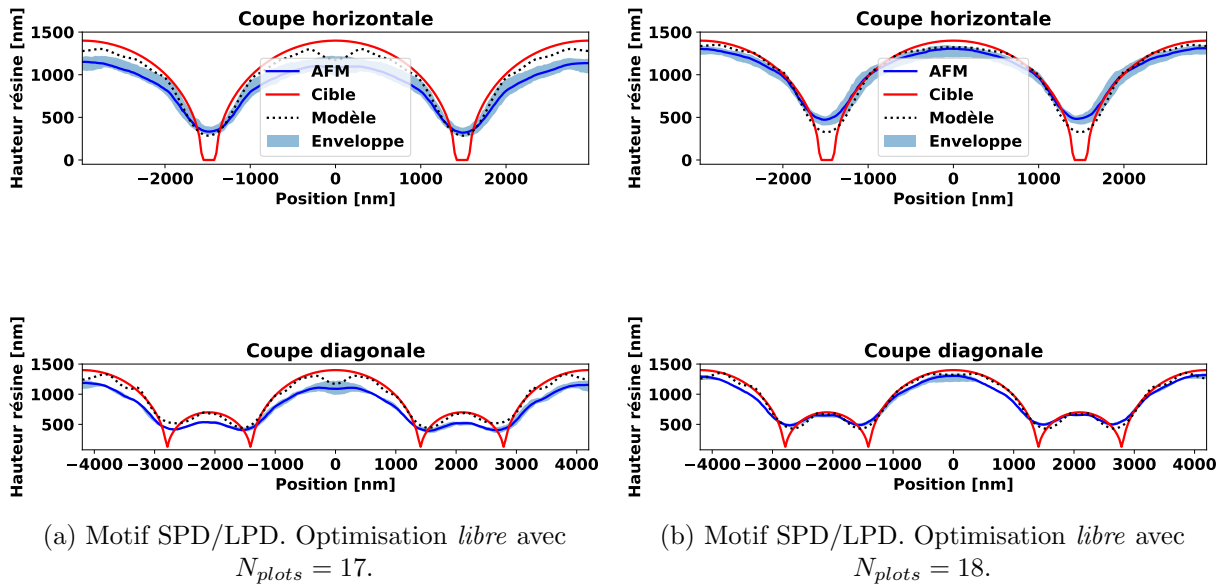


FIGURE 5.52 – Profils expérimentaux, simulés et cibles pour le motif SPD/LPD en optimisation *libre* pour $N_{plots} = 17$ et $N_{plots} = 18$.

Le masque avec $N_{plots} = 18$ est plus fidèle au profil simulé que celui à $N_{plots} = 17$. Comme attendu par simulation, il n'est pas possible d'obtenir le «retour» à zéro dans la résine.

Les profils de SPD/LPD en optimisation *libre* ont été mesurés pour les 3 zones d'ORCA. Pour ces 3 pixellisations le profil obtenu avec la dose associée est tracé sur la Figure 5.53 ci-dessous :

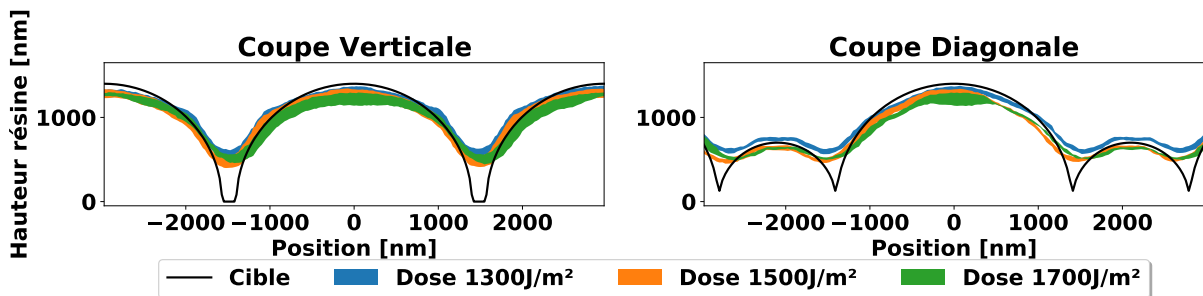


FIGURE 5.53 – Impact de la dose sur le motif SPD/LPD en optimisation libre avec $N_{plots} = 18$.

Aucune dose ne semble plus favorable qu'une autre pour adresser le motif de SPD/LPD. Une forte dose ne permet pas de mieux «creuser» la résine.

La Figure 5.54 ci-dessous présente deux images réalisées avec le SEM d'observation d'une matrice de SPD/LPD obtenue en optimisation *libre* avec $N_{plots} = 17$ et $N_{plots} = 18$.

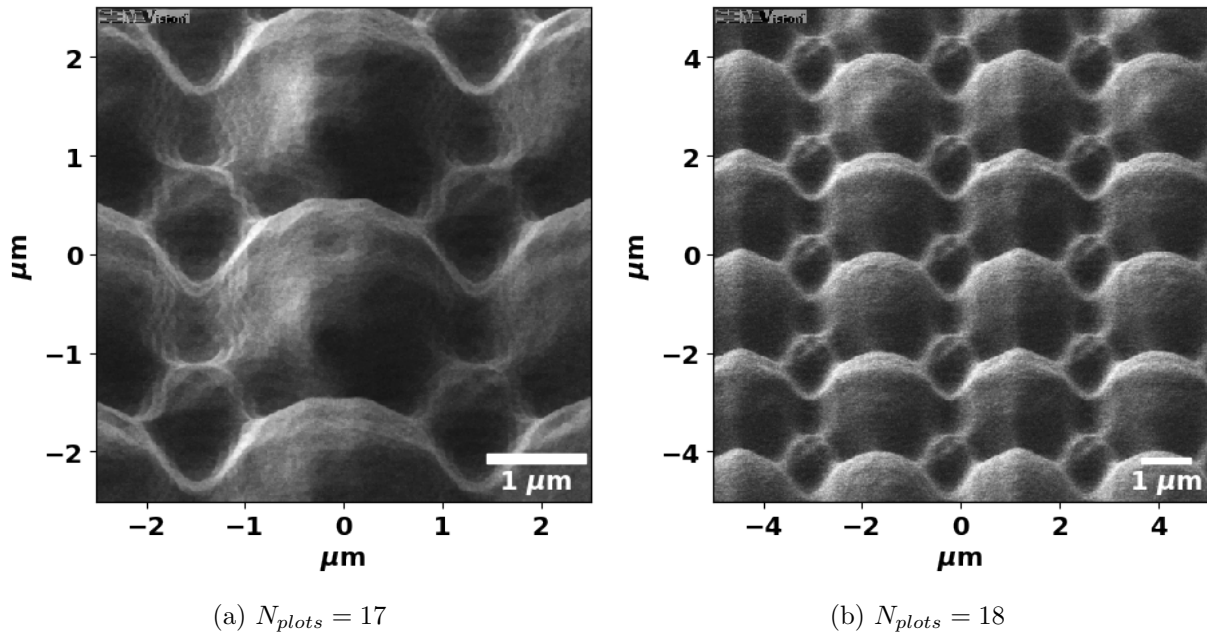


FIGURE 5.54 – Images SEM d’une portion de matrice de SPD/LPD obtenue en optimisation libre.

On observe clairement sur ces images que les SPD sont pontées avec les LPD dans la diagonale. Cette configuration n’est donc pour l’heure pas réalisable avec les outils d’optimisation développés dans cette thèse.

5.6.3 Conclusion

L’optimisation de masque traitée dans cette partie a démontré sa capacité à produire des microstructures aux dimensions d’intérêt et proches de celles souhaitées. La qualité des profils étant variable, il est possible de définir plusieurs domaines en fonction de la taille et de l’agencement des structures.

Les microstructures denses et définies sur la première moitié d’épaisseur de résine sont celles qui présentent le plus d’écart entre le profil simulé et cible. Lorsque la microstructure est définie sur la totalité de l’épaisseur de la résine, le résultat est sensiblement meilleur. Cependant la notion de densité ne semble pas évidente. En effet, des masques optimisés comme étant isolés génèrent des structures jointées avec les voisins. Cet effet est d’autant plus marqué si le masque a été optimisé en configuration dense. Le profil est systématiquement mieux défini dans la direction diagonale où la proximité avec les voisins est moins impactante.

Une partie des écarts entre les profils expérimentaux et ceux attendus peut s’expliquer par l’absence de prise en compte du defocus de l’image aérienne dans la résine au cours de l’exposition. En plus de subir l’absorption liée à sa propagation dans un matériau, l’image aérienne perd également en contraste. Cet effet étant négligé, l’intensité lumineuse dans les couches profondes de la résine est probablement sur-estimée par rapport à la réalité. L’intensité prédite par le modèle était suffisamment élevée pour permettre la dissolution de la résine lors de l’étape de développement, or ce n’est pas le cas en réalité.

Dans une moindre mesure, il est également possible qu’une plus grande variété de profils utilisés pour la calibration du modèle de développement aurait apporté un effet bénéfique sur les profils expérimentaux.

Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre l'approche d'optimisation de masque a été présentée et évaluée sur des profils réels.

La première partie du chapitre s'est concentrée sur la description des éléments relatifs à l'optimisation d'un masque grayscale. Les choix de l'optimiseur, du point de départ et des fonctions de coût ont été explicités et justifiés. Une attention particulière a été donnée à l'optimisation *libre* pour laquelle le respect des règles MRC est plus délicat à gérer.

La division de l'optimisation en deux étapes a été justifiée par la nécessité d'assurer la convergence de l'optimisation en un temps le plus court possible. La première étape ne fait appel qu'au modèle optique (temps de calcul rapide) : le masque est optimisé en fonction de l'image aérienne cible associée au profil résine cible. Le masque obtenu à l'issue de cette étape est qualifié de masque intermédiaire. Ce dernier, même s'il permet d'obtenir un profil résine proche de celui visé, peut être amélioré. C'est l'objectif de la seconde étape d'optimisation qui utilise le masque intermédiaire et le modèle complet de manière à parfaire le profil résine obtenu.

Cette séparation en deux étapes n'est valide que s'il est possible de déterminer l'image aérienne cible en fonction d'un profil résine cible. Cet aspect a été traité en détail et illustré sur deux microstructures : une microlentille et une pyramide.

L'algorithme d'optimisation de masque a été utilisé à grande échelle pour créer un second masque. Les profils expérimentaux obtenus avec ce masque confirment qu'il est possible d'obtenir des formes se rapprochant des structures visées. Cependant, il est apparu que les effets de proximité liés aux voisins directs (horizontaux et verticaux) aboutissent à des aboutements des profils à une altitude plus élevée que celle attendue en simulation. Il est également plus difficile d'obtenir les motifs enterrés que ceux définis sur la totalité de l'épaisseur de résine. L'absence de profils similaires lors de la calibration du modèle de développement est la non prise en compte du defocus de l'image aérienne dans l'épaisseur de résine sont les principales causes envisagées.

Chapitre 6

Conclusions et perspectives

6.1 Conclusions

Ce travail de thèse a évalué les possibilités offertes par la lithographie grayscale pour réaliser des microstructures en résine photosensible dont les dimensions verticales et horizontales sont inférieures à $3\mu\text{m}$. Ces dimensions sont notamment celles des microlentilles utilisées dans les capteurs d'images CMOS commercialisés par STMicroelectronics. L'objectif initial de la thèse était d'obtenir par lithographie grayscale des matrices de microlentilles hybrides composées d'éléments de différentes tailles en une seule étape de lithographie. De manière plus générale, la thèse s'est inscrite dans un travail d'évaluation des échelles et domaines d'application de la lithographie grayscale, sans considération du type de structure.

Le point de départ de la thèse a consisté à créer un masque grayscale (FISH) appliqué à nos dimensions d'intérêt, en se basant sur les approches existantes de l'état de l'art pour la création de masques grayscale. Un cadre théorique a été construit de manière à relier la taille d'un plot de chrome sur le masque à la hauteur de résine souhaitée. Cette méthodologie a été développée sans connaissance de la résine, variable inconnue à ce moment de la thèse. Les pixellisations intégrées sur ce premier masque ont notamment été utilisées afin de caractériser les résines sélectionnées, mais également pour évaluer la capacité de l'approche «classique» de création de masque. Sur les deux résines étudiées, une seule a été retenue. L'exploitation des résultats expérimentaux a souligné un écart important entre les profils obtenus et ceux attendus, confirmant l'impossibilité d'utiliser la méthode «classique» de création de masque pour les dimensions visées dans le cadre de la thèse.

Plus précisément, ce sont les variations rapides de densité de chrome sur les masques qui ne permettent plus de se reposer sur une approximation purement verticale du développement de la résine (courbe de contraste). Ce cadre de travail, valide lorsque les dimensions visées sont grandes, ne s'applique plus pour les dimensions visées dans cette thèse. Ces observations ont motivé le développement d'un modèle lithographique rigoureux.

Ce modèle lithographique a été développé en langage Python afin de garantir son déploiement dans l'entreprise et le laboratoire. Le modèle permet de simuler le profil résine obtenu pour un masque et des conditions de procédé fixées (une résine, des conditions d'exposition et de développement). Dans un premier temps, l'image aérienne associée au masque est calculée. Cette dernière est utilisée afin de simuler le phénomène d'exposition de la résine. Le développement est quant à lui modélisé par une fonction empirique : le modèle de Mack à 4 paramètres. Les paramètres de cette fonction ont été déterminés par une optimisation numérique (calibration) utilisant des profils expérimentaux obtenus avec FISH et mesurés en AFM. La calibration s'est avérée efficace pour modéliser les motifs isolés. En revanche, les motifs denses sont moins bien décrits : la proximité des voisins n'est pas suffisamment prise en compte.

En utilisant le modèle lithographique calibré, une méthodologie d'optimisation de masque

a été développée. Cette dernière consiste à déterminer le masque grayscale idéal permettant d'obtenir une forme donnée dans la résine se rapprochant d'une microstructure cible. Deux stratégies ont été implémentées : la première consiste à optimiser uniquement la taille des plots de chrome disposés sur une grille prédéfinie. La seconde optimise en plus de la taille, la position des plots sur cette grille. Dans les deux cas, l'obtention du masque est réalisée en 2 étapes d'optimisation numérique. La première consiste à optimiser les plots du masque en utilisant exclusivement le modèle optique. Pour cela une méthodologie de conversion entre le profil résine cible et l'image aérienne cible a été développée. Le masque intermédiaire obtenu après cette première étape est utilisé comme point de départ pour une seconde optimisation se basant cette fois sur le modèle lithographique complet, c'est-à-dire sur le profil résine cible. La séparation de l'optimisation en deux étapes permet d'accélérer le processus d'optimisation et d'assurer la convergence de la seconde optimisation, difficilement réalisable sans le masque intermédiaire.

L'utilisation des symétries des profils résines a permis d'accélérer l'optimisation. En outre, le respect des règles de dessin est assuré tout au long de l'optimisation du masque. L'optimisation simultanée de la position et de la taille des plots par cette approche est sans précédent dans la littérature. Cette méthodologie d'optimisation de masque a été utilisée pour générer plusieurs centaines de pixellisations intégrées sur un second masque grayscale appelé ORCA.

Les résultats expérimentaux obtenus avec ce second masque sont très encourageants malgré un changement de dissolution de la résine intervenu avant la réception du masque. Les profils obtenus sont cohérents avec ceux attendus en simulation. La principale difficulté du modèle mise en évidence par les données expérimentales est sa capacité à prédire les jonctions entre un motif et ses voisins directs. Les profils expérimentaux se «touchent» verticalement et horizontalement à une altitude supérieure à celle prévue en simulation. Cet effet se traduit par l'obtention de motifs denses en réalité «pontés» qui devraient être isolés. Comme prévu par la simulation, les motifs «enterrés» dans la résine, c'est-à-dire définis sur la première moitié d'épaisseur sont difficiles à obtenir. La configuration SPD/LPD illustre de son côté la difficulté à obtenir les microlentilles enterrées en même temps que les grandes. Afin d'améliorer les résultats obtenus il serait intéressant de prendre en compte le defocus de l'image aérienne au cours de l'exposition puis de réaliser une nouvelle calibration du modèle de développement en incluant une plus grande variété de profils (notamment des «enterrés»). L'apport de la méthodologie d'optimisation de masque est cependant importante au vu de la variété des profils obtenus et de leur proximité à la cible attendue.

Il est important de mentionner que l'ensemble des développements numériques réalisés dans le cadre de la thèse l'ont été avec un haut niveau de qualité (documentation, exemples, tests de non régression, structure SVN...). Ceci a permis de transférer l'ensemble des codes à STMicroelectronics afin de pouvoir poursuivre les travaux sur la lithographie grayscale.

En conclusion, nous avons démontré que l'utilisation de la lithographie grayscale de manière classique avec une approche à base de courbe de contraste ne permet pas d'obtenir des microstructures de dimensions inférieures à $3\mu\text{m}$. En utilisant un modèle lithographique complet et rigoureux couplé à une méthodologie d'optimisation de masque innovante, cette limitation a été repoussée. L'optimisation simultanée de la taille et de la position des plots de chrome permet d'affirmer que la lithographie grayscale est en mesure de générer des structures dont les dimensions verticales et horizontales sont comprises entre $1\mu\text{m}$ et $3\mu\text{m}$. L'obtention de microstructures plus petites et ou «enterrées» dans la résine reste très difficile sans une étape de complexification des modèles utilisés.

6.2 Améliorations et perspectives

Dans cette section plusieurs pistes d'améliorations et de perspectives sont proposées afin de poursuivre le travail entamé dans cette thèse.

6.2.1 Vers un modèle lithographique plus poussé

Le modèle lithographique présenté dans ce manuscrit a été le fruit de réflexions et travaux permanents. Il a donc évolué tout au long de la thèse. L'état du modèle lors de la calibration du modèle de développement au chapitre 4 était assez simple mais permettait dans le même temps d'assurer des temps de calcul raisonnables. C'est ce modèle qui a été utilisé pour créer les pixellisations d'ORCA.

Au cours de la thèse (notamment pendant la période du confinement), le modèle résine a bénéficié de la prise en compte d'effets supplémentaires : le *scaled-defocus* et les ondes stationnaires. L'ajout de ces effets impacte directement le temps de calcul nécessaire à la simulation d'un profil. Ces développements sont arrivés trop tardivement pour être utilisés sur ORCA.

Nous avons vu au chapitre 5 que l'absence de prise en compte du defocus de l'image aérienne dans le modèle est préjudiciable pour les zones des profils les plus enterrées : pour les petits motifs et les pieds des grands. Il serait donc intéressant d'utiliser un modèle calibré plus complet incluant le *scaled-defocus* de la même manière que le modèle utilisé pendant la thèse afin de confirmer ces observations.

Un début de réponse est donné par la section 7.2 en annexe qui illustre l'apport de la prise en compte du defocus sur la forme des motifs simulés. L'utilisation de calculs multi-thread ou GPU permettrait de compenser l'augmentation du temps de calcul notamment pour calculer le Jacobien lors de l'optimisation de masque ou encore lors de la simulation de l'étape de développement (*fast-marching*). Des premiers essais réalisés soulignent un gain de vitesse d'un facteur 7 pour l'optimisation de masque.

6.2.2 Résine négative

Les résines utilisées au cours de ce travail sont toutes positives : ce sont les zones exposées qui sont retirées lors de l'étape développement. Dans le cas d'une microlentille, le sommet doit recevoir une faible dose de lumière. La dose augmente vers le bord de la microlentille de manière à retirer progressivement la résine. La microlentille inversée est obtenue sur le même principe mais en inversant les doses.

Expérimentalement, les profils obtenus pour la microlentille inversée sont plus proches de ceux attendus que pour la microlentille normale. Cette observation laisse à penser qu'il est plus «facile» de creuser la résine que de chercher à la conserver pour le cas d'une résine positive.

Une piste de recherche consisterait à utiliser une résine négative pour réaliser les microstructures. Les modèles optique et résine développés dans cette thèse restent valides pour traiter des résines négatives.

Cependant, la sensibilité des résines négatives est généralement plus importante que celle des résines positives (contraste plus élevée) ce qui pourrait présenter un frein à son utilisation en grayscale.

6.2.3 Motifs non Manhattans

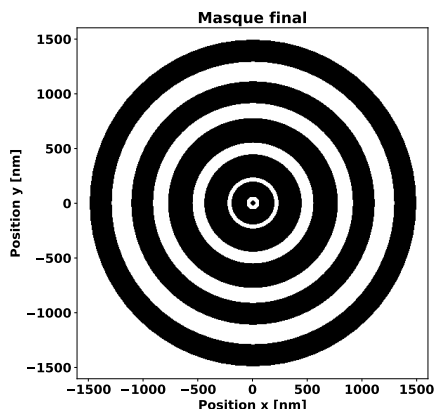
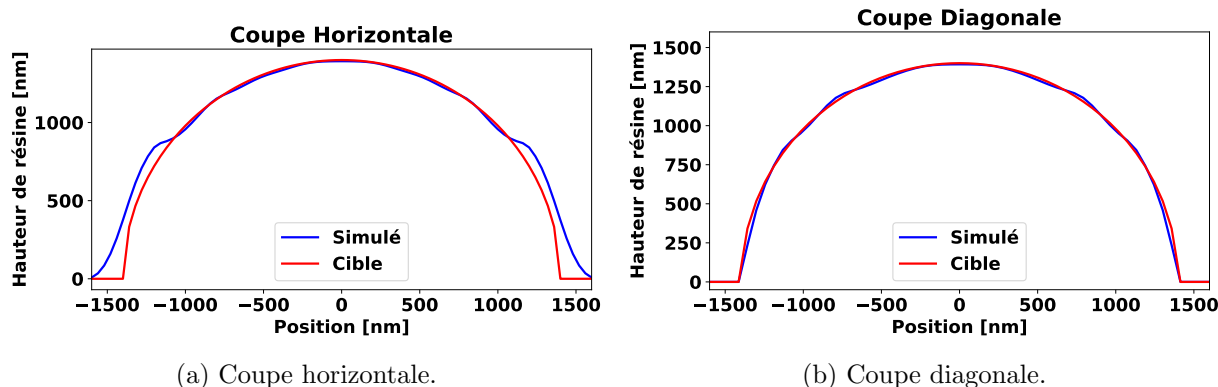


FIGURE 6.1 – Masque grayscale optimisé à base d’anneaux.

Dans le cadre de la thèse, les éléments de chrome utilisés pour l’optimisation de masque sont de géométrie carrée. Il serait intéressant d’élargir la gamme de formes utilisables en incluant par exemple des rectangles et des triangles rectangles. Ces formes restent facilement réalisables par les fabricants de masque.

Des structures en anneaux sont également envisageables pour adresser les motifs de résine à géométrie centrosymétrique à l’image des microlentilles et des cônes. La Figure 6.1 ci-contre illustre un masque composés d’anneaux réalisés au cours de la thèse pour le profil de microlentille de rayon 1400nm et période 1800nm. Les profils simulés associés à ce masque sont illustrés sur la Figure 6.2 ci-dessous.



(a) Coupe horizontale.

(b) Coupe diagonale.

FIGURE 6.2 – Profils résine obtenus avec le masque de la Figure 6.1.

Le profil est bien défini le long de la diagonale mais pas sur l’axe horizontal. Le temps investi dans la thèse à l’exploration de masque à base d’anneaux est resté limité puisque le coût de fabrication d’un tel masque est beaucoup plus important qu’un masque composé d’éléments rectangulaires.

Cette option est néanmoins un candidat sérieux pour plusieurs raisons :

1. Le nombre de paramètres à optimiser est relativement réduit. Pour k anneaux il suffit d’optimiser $2k - 1$ paramètres (rayons intérieurs et extérieurs¹).
2. Le contrôle des règles de dessin est simple.
3. La formule analytique de la transformée de Fourier d’un anneau est connue.

1. Le -1 vient du rayon interne de l’anneau central qui n’est pas optimisé.

6.2.4 Utilisation d'une nouvelle norme

Lors de l'optimisation de masque, la fonction de coût utilisée est basée sur le calcul d'une norme L_2 qui compare verticalement la différence de hauteur entre le profil simulé et le profil cible. Il serait intéressant de calculer cette distance non pas verticalement mais en utilisant des normales définies le long du profil simulé. Ce principe est illustré sur la Figure 6.3 ci-dessous :

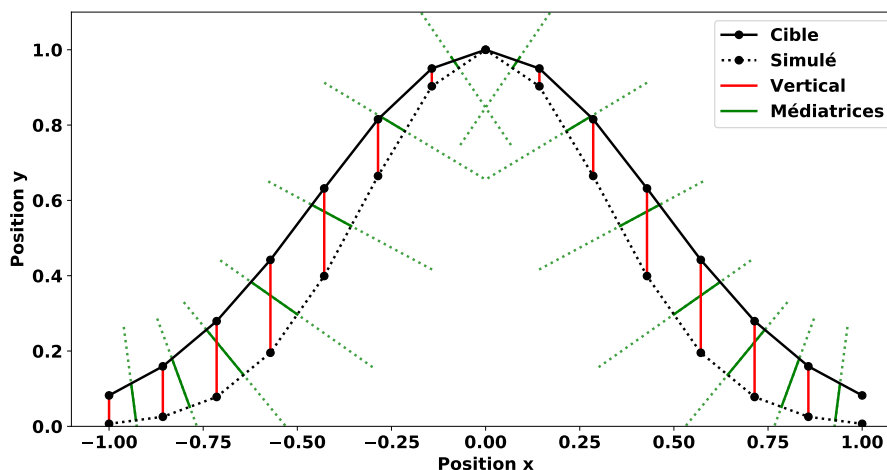


FIGURE 6.3 – Approches pour calculer la différence entre le profil résine cible et le profil simulé lors de l'optimisation de masque.

La méthode actuelle correspond aux traits verticaux rouges. L'approche proposée consiste à tracer les normales (lignes en pointillés verts) pour chaque segment du profil simulé de manière à déterminer la distance entre le profil simulé et le profil cible le long de cette droite (segments verts).

Cette approche semble plus naturelle compte tenu de la formation des profils résines en lithographie. Par exemple, l'effet de la dose sur les profils correspond souvent à une contraction ou à une dilatation du motif mieux pris en compte par cette description.

6.2.5 Intelligence artificielle

L'optimisation de masque a été réalisée en considérant des plots de chrome carrés et en utilisant un optimiseur numérique à descente de gradient. Il est fort probable que d'autres approches puissent fournir de meilleurs résultats.

La question se pose notamment pour l'utilisation de l'intelligence artificielle qui permettrait d'envisager un processus d'optimisation sans limitation de géométrie pour les motifs de chrome. Ce type d'optimisation appelée *free-form* pourrait s'inspirer des techniques de lithographie inverse : Inverse Lithography Techniques (ILT)². Un travail sur le sujet est en cours au sein du laboratoire d'accueil.

La principale limitation de cette approche est la réalisation pratique des masques obtenus. Ces derniers ne respecteront pas forcément les règles de dessin. De plus, il n'est pas envisageable d'utiliser des données expérimentales pour entraîner les modèles à cause du temps d'acquisition des profils AFM. Le réseau devra être entraîné à partir de profils simulés ce qui peut limiter son intérêt.

2. L'ILT est une approche de construction de masque par réseau de neurones pour l'instant reléguée à des applications niches [SemiEngineering, 2020].

Bibliographie

- [can, 2020] (2020). Canyon material website. <http://www.canyonmaterials.com/>.
- [hei, 2020] (2020). Dwl 66+ datasheet. <https://heidelberg-instruments.com/files/downloads/fact-sheets/fact-sheet-dwl-66.pdf>.
- [sei, 2020] (2020). Seing double. <https://spectrum.ieee.org/semiconductors/design/seeing-double>.
- [Abbe, 1873] Abbe, E. (1873). Beiträge zur theorie des mikroskops und der mikroskopischen wahrnehmung. *Archiv für mikroskopische Anatomie*, 9(1) :413–418.
- [Adam and Maurer, 2004] Adam, K. and Maurer, W. (2004). Polarization effects in immersion lithography. In *Optical Microlithography XVII*, volume 5377, pages 329–343. International Society for Optics and Photonics.
- [Allouti et al., 2019] Allouti, N., Chevalier, P., Bérard-Bergery, S., Rousset, V., Mortini, B., Quéméré, P., Tomaso, F., and Coquand, R. (2019). Grayscale lithography process study for sub $5\mu\text{m}$ microlens patterns. In *Novel Patterning Technologies for Semiconductors, MEMS/-NEMS, and MOEMS 2019*, volume 10958, page 1095809. International Society for Optics and Photonics.
- [Alpert et al., 2008] Alpert, C. J., Mehta, D. P., and Sapatnekar, S. S. (2008). *Handbook of algorithms for physical design automation*. Auerbach Publications.
- [Audran, 2007] Audran, S. (2007). *Etude des propriétés et des mécanismes de mise en forme des résines photolithographiques pour une application capteurs d’images CMOS avancés*. PhD thesis, Université Louis Pasteur (Strasbourg).
- [Audran et al., 2010] Audran, S., Vaillant, J., Farys, V., Hirigoyen, F., Huss, E., Mortini, B., Cowache, C., Berthier, L., Mortini, E., Fantuz, J., Arnaud, O., Depoyan, L., Sundermann, F., Baron, C., and Reynard, J.-P. (2010). Grayscale lithography process study applied to zero-gap microlenses for sub $2\mu\text{m}$ cmos image sensors. In *SPIE*, volume 7639.
- [Babu and Barouch, 1986] Babu, S. and Barouch, E. (1986). Exact solution of dills model equations for positive photoresist kinetics. *IEEE Electron Device Letters*, 7(4) :252–253.
- [Bailey and Adam, 2005] Bailey, G. E. and Adam, K. (2005). Polarization influences through the optical path. In *Optical Microlithography XVIII*, volume 5754, pages 1102–1112. International Society for Optics and Photonics.
- [Beer, 1852] Beer, A. (1852). Bestimmung der absorption des rothen lights in farbigen flüssigkeiten. *Ann. Physik*, 162 :78–88.
- [Bérard-Bergery et al., 2019] Bérard-Bergery, S., Hazart, J., Henry, J.-B., Quéméré, P., Beylier, C., Allouti, N., Cordeau, M., Eleouet, R., Tomaso, F., Ostrovsky, A., and Rousset, V. (2019). 3d resist reflow compact model for imagers microlens shape optimization. In Cain, J. P. and Yuan, C.-M., editors, *Design-Process-Technology Co-optimization for Manufacturability XIII*. SPIE.
- [Bernard, 1988] Bernard, D. (1988). Simulation of focus effects in photolithography. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1(3) :85–97.

- [Born et al., 1999] Born, M., Wolf, E., Bhatia, A. B., Clemmow, P. C., Gabor, D., Stokes, A. R., Taylor, A. M., Wayman, P. A., and Wilcock, W. L. (1999). *Principles of Optics*. Cambridge University Press.
- [Boyle and Smith, 1970] Boyle, W. S. and Smith, G. E. (1970). Charge coupled semiconductor devices. *Bell System Technical Journal*, 49(4) :587–593.
- [Bruning, 2007] Bruning, J. H. (2007). Optical lithography : 40 years and holding. In *Optical Microlithography XX*, volume 6520, page 652004. International Society for Optics and Photonics.
- [Burnett, 2004] Burnett, J. H. (2004). Measurement of the refractive index and thermo-optic coefficient of water near 193 nm. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 3(1) :68.
- [Byers et al., 2002] Byers, J. D., Smith, M. D., and Mack, C. A. (2002). 3d lumped parameter model for lithographic simulations. In Yen, A., editor, *Optical Microlithography XV*. SPIE.
- [Chevalier, 2020] Chevalier, P. (2020). Synthèse du stack orca, réunion de suivi st/cea septembre 2020.
- [Chevalier et al., 2019] Chevalier, P., Quéméré, P., Beylier, C., Bérard-Bergery, S., Allouti, N., Paris, M., Farys, V., and Vaillant, J. (2019). Beyond contrast curve approach : a grayscale model applied to sub-5 μ m patterns. In *Novel Patterning Technologies for Semiconductors, MEMS/NEMS, and MOEMS 2019*, volume 10958, page 109581E. International Society for Optics and Photonics.
- [CIE, 2020] CIE (2020). International standard. <http://cie.co.at/publications/international-standards>.
- [Cobb, 1995] Cobb, N. (1995). Sum of coherent systems decomposition by svd. *University of California at Berkeley, Tech. Rep.*
- [Cole, 1992] Cole, D. C. (1992). Extending scalar aerial image calculations to higher numerical apertures. *Journal of Vacuum Science & Technology B : Microelectronics and Nanometer Structures*, 10(6) :3037.
- [Cole et al., 1992] Cole, D. C., Barouch, E., Hollerbach, U., and Orszag, S. A. (1992). Derivation and simulation of higher numerical aperture scalar aerial images. *Japanese Journal of Applied Physics*, 31(Part 1, No. 12B) :4110–4119.
- [Deng et al., 2017] Deng, Q., Yang, Y., Gao, H., Zhou, Y., He, Y., and Hu, S. (2017). Fabrication of micro-optics elements with arbitrary surface profiles based on one-step maskless grayscale lithography. *Micromachines*, 8(10) :314.
- [Development, 2018] Development, Y. (2018). Wafer starts for more than moore applications.
- [Développement, 2018] Développement, Y. (2018). Status of the cmos image sensors industry. *Lyon, France*.
- [Dill et al., 1975a] Dill, F., Hornberger, W., Hauge, P., and Shaw, J. (1975a). Characterization of positive photoresist. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 22(7) :445–452.
- [Dill, 1975] Dill, F. H. (1975). Optical lithography. *IEEE transactions on electron devices*, 22(7) :440–444.
- [Dill et al., 1975b] Dill, F. H., Neureuther, A. R., Tuttle, J. A., and Walker, E. J. (1975b). Modeling projection printing of positive photoresists. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 22(7) :456–464.
- [Dillon et al., 2008] Dillon, T., Zablocki, M., Murakowski, J., and Prather, D. (2008). Processing and modeling optimization for grayscale lithography. In *Advances in Resist Materials and Processing Technology XXV*, volume 6923, page 69233B. International Society for Optics and Photonics.

- [Economist, 2020] Economist, T. (2020). Double, double, toil and trouble. <https://www.economist.com/technology-quarterly/2016-03-12/after-moores-law>.
- [Fallica et al., 2017] Fallica, R., Kirchner, R., Schiff, H., and Ekinici, Y. (2017). High-resolution grayscale patterning using extreme ultraviolet interference lithography. *Microelectronic Engineering*, 177 :1–5.
- [Flack et al., 2002] Flack, W. W., Nguyen, H.-A., and Capsuto, E. S. (2002). Characterization of a novel photoresist redistribution material for advanced packaging applications. In *Advances in Resist Technology and Processing XIX*, volume 4690, pages 1203–1216. International Society for Optics and Photonics.
- [Flagello, 1993] Flagello, D. G. (1993). *High numerical aperture imaging in homogeneous thin films*. PhD thesis, MIT.
- [Flagello and Smith, 2012] Flagello, D. G. and Smith, D. G. (2012). Calculation and uses of the lithographic aerial image. *Advanced Optical Technologies*, 1(4) :237–248.
- [Fontaine, 2019] Fontaine, R. (2019). The state-of-the-art of smartphone imagers. In *International Image Sensor Workshop*, page R01.
- [Fossum, 1993] Fossum, E. R. (1993). Active pixel sensors : Are ccds dinosaurs? In *Charge-Coupled Devices and Solid State Optical Sensors III*, volume 1900, pages 2–14. International Society for Optics and Photonics.
- [Fühner et al., 2007] Fühner, T., Schnattinger, T., Ardelean, G., and Erdmann, A. (2007). Dr. litho : a development and research lithography simulator. In *Optical Microlithography XX*, volume 6520, page 65203F. International Society for Optics and Photonics.
- [Gallatin, 2001] Gallatin, G. M. (2001). High-numerical-aperture scalar imaging. *Applied Optics*, 40(28) :4958.
- [Goodman, 2005] Goodman, J. W. (2005). *Introduction to Fourier optics*. Roberts and Company Publishers.
- [Gross, 2005] Gross, H. (2005). Handbook of optical systems, volume 1, fundamentals of technical optics. *Handbook of Optical Systems, Volume 1, Fundamentals of Technical Optics*, by Herbert Gross, pp. 848. ISBN 3-527-40377-9. Wiley-VCH, April 2005., page 848.
- [Gross et al., 2005] Gross, H., Singer, W., and Totzeck, M. (2005). *Handbook of Optical Systems : Physical Image Formation* *Handbook of Optical Systems : Physical Image Formation, 2 (4)*, 714 Wiley. VCH, Weinheim.
- [Henry, 2020] Henry, J.-B. (2020). Hemispheres screening, réunion de suivi st/cea mars2020.
- [Herrick, 1966] Herrick, C. (1966). Solution of the partial differential equations describing photo-decomposition in a light-absorbing matrix having light-absorbing photoproducts. *IBM Journal of Research and Development*, 10(1) :2–5.
- [Hopkins, 1953] Hopkins, H. H. (1953). On the diffraction theory of optical images. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 217(1130) :408–432.
- [Khazi et al., 2018] Khazi, I., Muthiah, U., and Mescheder, U. (2018). 3d free forms in c-si via grayscale lithography and rie. *Microelectronic Engineering*, 193 :34–40. cited By 0.
- [Kim, 2007] Kim, S. (2007). Polarized effects in optical lithography with high na technology. *JOURNAL-KOREAN PHYSICAL SOCIETY*, 50(6) :1952.
- [Kintner, 1978] Kintner, E. C. (1978). Method for the calculation of partially coherent imagery. *Applied optics*, 17(17) :2747–2753.
- [Kodak, 2012] Kodak (2012). How kodak invented the digital camera in 1975. <https://www.techradar.com/news/cameras/photography-video-capture/how-kodak-invented-the-digital-camera-in-1975-364822>.

- [Köhler, 1893] Köhler, A. (1893). Ein neues beleuchtungsverfahren für mikrographische zwecke. *Zeitschrift für wissenschaftliche Mikroskopie und für Mikroskopische Technik*, 10(4) :433–440.
- [Konnerth and Dill, 1975] Konnerth, K. L. and Dill, F. H. (1975). In-situ measurement of dielectric thickness during etching or developing processes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 22(7) :452–456.
- [Lambert, 1760] Lambert, J. H. (1760). *Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*. Klett.
- [LeCompte et al., 2001] LeCompte, M., Gao, X., and Prather, D. W. (2001). Photoresist characterization and linearization procedure for the gray-scale fabrication of diffractive optical elements. *Applied Optics*, 40(32) :5921–5927.
- [Levinson, 2005] Levinson, H. J. (2005). *Principles of lithography*, volume 146. SPIE press.
- [Lima et al., 2019] Lima, F., Khazi, I., Mescheder, U., Tungal, A. C., and Muthiah, U. (2019). Fabrication of 3d microstructures using grayscale lithography. *Advanced Optical Technologies*, 8(3-4) :181–193.
- [Loomis et al., 2016] Loomis, J., Ratnayake, D., McKenna, C., and Walsh, K. M. (2016). Grayscale lithography—automated mask generation for complex three-dimensional topography. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 15(1) :013511.
- [Luo and Zhang, 2017] Luo, N. and Zhang, Z. (2017). Fabrication of a curved microlens array using double gray-scale digital maskless lithography. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 27(3) :035015.
- [Ma and Arce, 2008] Ma, X. and Arce, G. (2008). Binary mask optimization for inverse lithography with partially coherent illumination. *JOSA A*, 25(12) :2960–2970.
- [Ma and Arce, 2009] Ma, X. and Arce, G. R. (2009). Pixel-based simultaneous source and mask optimization for resolution enhancement in optical lithography. *Optics express*, 17(7) :5783–5793.
- [Ma and Arce, 2011] Ma, X. and Arce, G. R. (2011). *Computational lithography*, volume 77. John Wiley & Sons.
- [Ma et al., 2015] Ma, X., Kato, Y., van Kempen, F., Hirai, Y., Tsuchiya, T., van Keulen, F., and Tabata, O. (2015). Experimental study of numerical optimization for 3-d microstructuring using dmd-based grayscale lithography. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 24(6) :1856–1867.
- [Mack, 2008] Mack, C. (2008). *Fundamental principles of optical lithography : the science of microfabrication*. John Wiley & Sons.
- [Mack, 1986] Mack, C. A. (1986). Analytical expression for the standing wave intensity in photoresist. *Applied Optics*, 25(12) :1958.
- [Mack, 1987] Mack, C. A. (1987). Photoresist process optimization. In *KTI Microelectronics Seminar, Proc*, pages 153–167.
- [Mack, 1988] Mack, C. A. (1988). Understanding focus effects in submicron optical lithography. In *Optical/Laser Microlithography*, volume 922, pages 135–148. International Society for Optics and Photonics.
- [Mack, 1997] Mack, C. A. (1997). Inside prolith. *A Comprehensive Guide to Optical Lithography Simulation, FINLE Technologies (Austin, TX : 1997)*, 30.
- [Mack, 1998] Mack, C. A. (1998). *Modeling solvent effects in optical lithography*. University of Texas at Austin.
- [Mack, 2005] Mack, C. A. (2005). Thirty years of lithography simulation. In *Optical Microlithography XVIII*, volume 5754, pages 1–12. International Society for Optics and Photonics.

- [Mack, 2006] Mack, C. A. (2006). *Field guide to optical lithography*, volume 6. SPIE Press Bellingham, WA.
- [Mack et al., 1987] Mack, C. A., Stephanakis, A., and Hershel, R. (1987). Lumped parameter model of the photolithographic process. pages 228–238.
- [Matsuzawa et al., 1987] Matsuzawa, T., Moniwa, A., Hasegawa, N., and Sunami, H. (1987). Two-dimensional simulation of photolithography on reflective stepped substrate. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 6(3) :446–451.
- [Mercado, 1999] Mercado, R. I. (1999). Large na projection lens for excimer laser lithographic systems. US Patent 5,969,803.
- [Moore et al., 1965] Moore, G. E. et al. (1965). Cramming more components onto integrated circuits.
- [Morgan et al., 2004] Morgan, B., Waits, C., Krizmanic, J., and Ghodssi, R. (2004). Development of a deep silicon phase fresnel lens using gray-scale lithography and deep reactive ion etching. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 13(1) :113–120.
- [Mosher et al., 2009] Mosher, L., Waits, C. M., Morgan, B., and Ghodssi, R. (2009). Double-exposure grayscale photolithography. *Journal of microelectromechanical systems*, 18(2) :308–315.
- [Nock and Blaikie, 2008] Nock, V. and Blaikie, R. J. (2008). Fabrication of optical grayscale masks for tapered microfluidic devices. *Microelectronic Engineering*, 85(5-6) :1077–1082.
- [Ohta, 2020] Ohta, J. (2020). *Smart CMOS image sensors and applications*. CRC press.
- [Oppliger et al., 1994] Oppliger, Y., Sixt, P., Stauffer, J., Mayor, J., Regnault, P., and Voirin, G. (1994). One-step 3d shaping using a gray-tone mask for optical and microelectronic applications. *Microelectronic Engineering*, 23(1-4) :449–454.
- [O’Toole and Neureuther, 1979] O’Toole, M. and Neureuther, A. (1979). Influence of partial coherence on projection printing. In *Developments in Semiconductor Microlithography IV*, volume 174, pages 22–27. International Society for Optics and Photonics.
- [Popovic et al., 1988] Popovic, Z. D., Sprague, R. A., and Connell, G. A. N. (1988). Technique for monolithic fabrication of microlens arrays. *Applied Optics*, 27(7) :1281.
- [Purdy, 1994] Purdy, D. R. (1994). Fabrication of complex micro-optic components using photo-sculpting through halftone transmission masks. *Pure and Applied Optics : Journal of the European Optical Society Part A*, 3(2) :167–175.
- [Quenzer et al., 1995] Quenzer, H. J., Henke, W., Hoppe, W., Pilz, W., Reimer, K., and Wagner, B. (1995). Fabrication of relief-topographic surfaces with a one-step UV-lithographic process. *Microsystem Technologies*, 1(4) :196–201.
- [Rosenbluth et al., 2008] Rosenbluth, A. E., Azpiroz, J. T., Lai, K., Tian, K., Melville, D. O., Totzeck, M., Blahnik, V., Koolen, A., and Flagello, D. (2008). Radiometric consistency in source specifications for lithography. In *Optical Microlithography XXI*, volume 6924, page 69240V. International Society for Optics and Photonics.
- [Rupp, 2018] Rupp, K. (2018). 42 years of microprocessor trend data. <https://www.karlrupp.net/2018/02/42-years-of-microprocessor-trend-data/>.
- [Saied et al., 2007] Saied, M., Foussadier, F., Belledent, J., Trouiller, Y., Schanen, I., Yesilada, E., Gardin, C., Urbani, J. C., Sundermann, F., Robert, F., et al. (2007). 3d mask modeling with oblique incidence and mask corner rounding effects for the 32nm node. In *Photomask Technology 2007*, volume 6730, page 673050. International Society for Optics and Photonics.
- [Saleh and Rabbani, 1982] Saleh, B. E. and Rabbani, M. (1982). Simulation of partially coherent imagery in the space and frequency domains and by modal expansion. *Applied optics*, 21(15) :2770–2777.

- [Samsung, 2020] Samsung (2020). Isocell slim gh1. <https://www.samsung.com/semiconductor/minisite/isocell/mobile-image-sensors/isocell-slim-gh1/>.
- [Scikit-fmm, 2020] Scikit-fmm (2020). Scikit fast marching method. <https://pypi.org/project/scikit-fmm/>.
- [Scipy, 2020a] Scipy (2020a). Scipy optimize least squares. https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.least_squares.html.
- [Scipy, 2020b] Scipy (2020b). Scipy optimize minimize. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.minimize.html>.
- [SemiEngineering, 2020] SemiEngineering (2020). What happened to inverse lithography? <https://semiengineering.com/what-happened-to-inverse-lithography/>.
- [Sentauros, 2020] Sentauros (2020). Sentauros lithography : Predictive modeling of lithographic processes.
- [Sethian, 1996a] Sethian, J. A. (1996a). Fast-marching level-set methods for three-dimensional photolithography development. In Fuller, G. E., editor, *Optical Microlithography IX*. SPIE.
- [Sethian, 1996b] Sethian, J. A. (1996b). *Level Set Methods : Evolving Interfaces in Computational Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision, and Materials Science (Cambridge Monographs on Applied and Computational Mathematics)*. Cambridge University Press.
- [Smith et al., 2019] Smith, M. A., Berry, S., Parameswaran, L., Holtsberg, C., Siegel, N., Lockwood, R., Chrisp, M. P., Freeman, D., and Rothschild, M. (2019). Design, simulation, and fabrication of three-dimensional microsystem components using grayscale photolithography. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 18(4) :043507.
- [Smith et al., 2002] Smith, M. D., Byers, J. D., and Mack, C. A. (2002). Comparison between the process windows calculated with full and simplified resist models. In Yen, A., editor, *Optical Microlithography XV*. SPIE.
- [Theimer et al., 1952] Theimer, O., Wassermann, G., and Wolf, E. (1952). On the foundation of the scalar diffraction theory of optical imaging. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 212(1110) :426–437.
- [Toh, 1988] Toh, K. K. H. (1988). *Two-dimensional images with effects of lens aberrations in optical lithography*. Electronics Research Laboratory, College of Engineering, University of California, Berkeley.
- [Totsu et al., 2006] Totsu, K., Fujishiro, K., Tanaka, S., and Esashi, M. (2006). Fabrication of three-dimensional microstructure using maskless gray-scale lithography. *Sensors and Actuators A : Physical*, 130-131 :387–392.
- [Tournier et al., 2011] Tournier, A., Leverd, F., Favennec, L., Perrot, C., Pinzelli, L., Gatefait, M., Cherault, N., Jeanjean, D., Carrere, J., Hirigoyen, F., et al. (2011). Pixel-to-pixel isolation by deep trench technology : Application to cmos image sensor. In *IISW*.
- [Valade et al., 2019] Valade, C., Hazart, J., Bérard-Bergery, S., Sungauer, E., Besacier, M., and Gourgon, C. (2019). Tilted beam sem, 3d metrology for industry. In *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXXIII*, volume 10959, page 109590Y. International Society for Optics and Photonics.
- [Vision, 2015] Vision, A. (2015). Sony ccd discontinuation. <https://www.alliedvision.com/en/sony-ccd-discontinuation.html>.
- [Wagner et al., 1995] Wagner, B., Quenzer, H., Henke, W., Hoppe, W., and Pilz, W. (1995). Microfabrication of complex surface topographies using grey-tone lithography. *Sensors and Actuators A : Physical*, 46(1-3) :89–94.
- [Waits et al., 2005] Waits, C., Morgan, B., KASTANTIN, M., and GHODSSI, R. (2005). Microfabrication of 3d silicon MEMS structures using gray-scale lithography and deep reactive ion etching. *Sensors and Actuators A : Physical*, 119(1) :245–253.

- [Waits et al., 2002] Waits, C. M., Modafe, A., and Ghodssi, R. (2002). Investigation of gray-scale technology for large area 3d silicon mems structures. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 13(2) :170.
- [Wong, 2001] Wong, A. K. (2001). *Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography*. SPIE.
- [Wong, 2005] Wong, A.-K. (2005). *Optical imaging in projection microlithography*. SPIE.
- [Yang et al., 2007] Yang, J.-J., Liao, Y.-S., and Chen, C.-F. (2007). Fabrication of long hexagonal micro-lens array by applying gray-scale lithography in micro-replication process. *Optics Communications*, 270(2) :433–440.
- [Yao et al., 2000] Yao, J., Su, J., Du, J., Zhang, Y., Gao, F., Gao, F., Guo, Y., and Cui, Z. (2000). Coding gray-tone mask for refractive microlens fabrication. *Microelectronic Engineering*, 53(1-4) :531–534.
- [Yeung, 1988] Yeung, M. S. (1988). Modeling high numerical aperture optical lithography. In *Optical/Laser Microlithography*, volume 922, pages 149–168. International Society for Optics and Photonics.
- [Yuan et al., 2002] Yuan, X. C., Yu, W., Ngo, N., and Cheong, W. (2002). Cost-effective fabrication of microlenses on hybrid sol-gel glass with a high-energy beam sensitive gray-scale mask. *Optics Express*, 10(7) :303.

Table des figures

1	Évolution de la pénétration de marché pour les capteurs CMOS et CCD entre 2011 et 2023 [Développement, 2018].	2
2	Évolution de la taille de pixel des capteurs d'images commercialisés par STMicroelectronics entre 2002 et 2008 [Audran, 2007]. Le pixel de 1.4 μ m est toujours fabriqué aujourd'hui.	3
3	Vue en coupe de l'architecture FSI et BSI pour les capteurs d'images CMOS. Le trajet de la lumière dans l'architecture est représenté sous forme de 3 flèches. Ce trajet est plus court dans le cadre de l'architecture BSI que FSI.	4
4	Vue en coupe d'un capteur d'image CMOS en technologie FSI fabriqué par STMicroelectronics illustrant une isolation DTI.	5
5	Efficacité quantique des pixels rouge, vert et bleu en fonction de la longueur d'onde. L'efficacité quantique de chaque pixel est maximale dans la gamme de longueur d'onde correspondante.	5
1.1	La loi de Moore correspond à la courbe orange illustrant l'évolution du nombre de transistors par microprocesseur entre 1970 et 2017 [Rupp, 2018].	9
1.2	Échantillon de plusieurs prédictions relatives à la fin de la loi de Moore [Economist, 2020].	9
1.3	Courbes d'étalement à différentes viscosités.	10
1.4	Différence entre lithographie par contact 1.4a et par proximité 1.4b. Le masque est noté M	13
1.5	Schéma optique simplifié d'un système de lithographie par projection.	13
1.6	Schéma complet d'un système de projection [Mercado, 1999].	14
1.7	Évolution des types de sources utilisées en photolithographie et de la résolution. La longueur d'onde et l'ouverture numérique NA (typique du système) est donnée pour chaque génération de source.	16
1.8	Impact du facteur de cohérence sur l'image aérienne d'un masque de type Heavyside avec illumination circulaire. $\lambda=365\text{nm}$, $\text{NA}=0.57$	18
1.9	Différentes géométries de source.	18
1.10	Configuration Köhler : plusieurs rayons issus d'un même point source émergent de la lentille de condenseur parallèlement de manière à illuminer uniformément le masque. La position du point source détermine l'angle d'incidence des rayons sur le masque.	19
1.11	Configuration Köhler : en l'absence de masque, la source est imagée au niveau de la pupille d'entrée de la lentille de projection par l'intermédiaire d'une lentille de collection. La pupille d'entrée est ici enterrée dans la lentille.	20
1.12	Illustration des différents types de masque utilisés en photolithographie. La transmission du masque, le champ électrique et l'intensité lumineuse reçue par la résine sont tracés.	21

1.13	Définition du cône d'acceptance d'une lentille.	22
1.14	Ordres de diffraction de deux réseaux périodiques illuminés par une onde plane monochromatique perpendiculairement à la surface du masque. L'angle d'acceptance angulaire de la lentille de projection est noté U . [Gross, 2005]	23
1.15	Projection de l'image du masque après diffraction avec les motifs de chrome. Les ordres de diffraction élevés ne sont pas captés par la lentille de projection.	24
1.16	Profil d'image aérienne pour un réseau ligne espace régulier à différentes conditions de collection des ordres de diffraction du masque. La structure à transférer est en pointillés noirs, l'image aérienne en rouge.	25
1.17	Profil d'image aérienne, pour deux masques de type Ligne/Espace juste en-dessous et au-dessus de la limite de résolution.	26
1.18	Courbe de contraste pour une résine positive et négative.	27
1.19	Visualisation du phénomène d'ondes stationnaires dans la résine [Mack, 2008].	28
2.1	Schéma de principe de la lithographie à micro-miroirs [Ma et al., 2015].	31
2.2	Images SEM pour différents types de pyramides après l'étape de développement (haut), de fluage (milieu) et après transfert dans le silicium (bas) [Lima et al., 2019].	32
2.3	Principe de l'exposition multiple, ici double exposition pour la lithographie classique [sei, 2020].	33
2.4	Étapes de procédé pour la génération d'une matrice dense de microlentilles à deux tailles.	34
2.5	Image SEM d'une matrice de microlentilles à deux tailles.	34
2.6	Micro-photo de la transmission d'un masque HEBS [Canyon Materials].	35
2.7	Nomenclature associée à un masque grayscale type PWM utilisé dans le cadre de cette thèse.	36
2.8	Illustration de la différence entre un masque à modulation de taille (2.8a) et de densité (2.8b) de plots.	37
2.9	Intensité transmise pour plusieurs densités de chrome. Le profil d'intensité est évalué le long de la ligne rouge sur les masques au sommet de résine (image aérienne).	37
2.10	Profil de résine après développement pour les 3 densités de chrome de la Figure 2.9 pour une épaisseur de résine initiale de 1550nm.	38
2.11	Exemple d'un masque grayscale complexe (2.11a) et de son image aérienne (2.11b) associée.	38
2.12	Illustration de trois courbes de contraste. La hauteur résultante de résine après développement est donnée en fonction de la dose reçue par la résine.	39
2.13	Image SEM de la lentille de Fresnel obtenue après transfert RIE dans du silicium [Morgan et al., 2004].	42
2.14	Principe de la double exposition grayscale afin d'obtenir une structure en escalier dans la résine. Impact d'un mésalignement du masque à droite et à gauche sur la structure obtenue.	42
2.15	Masque grayscale en halftoning. Les pixels en noirs sont en état «on».	43
2.16	Illustrations (profilomètre et SEM) de microstructures obtenues en lithographie grayscale après gravure [Smith et al., 2019].	43
3.1	Illustration du modèle lithographique par bloc.	46

3.2	Principe d'invariance par translation en régime paraxial. Sous incidence directe (flèches vertes), le spectre du masque est centré sur l'axe optique. Lorsque le masque est illuminé par une onde plane se propageant avec un angle θ relativement à l'axe optique (flèches rouges), le spectre du masque est translaté d'une quantité Δf	48
3.3	3 ondes planes incidentes à différentes angularités sur le masque 3.3a et correspondances en termes de points sources au niveau de la pupille d'entrée de la lentille de projection 3.3b.	50
3.4	Évolution de la valeur maximale du facteur d'obliquité K_{max} en fonction de l'ouverture numérique de la lentille de projection NA avec $\bar{M} = 0.25$	53
3.5	Comparaison de trois images aériennes pour différents masques illustrant l'impact du facteur d'obliquité. Les paramètres optiques utilisés sont les suivants : NA=0.57, $\sigma = 0.7$, $\lambda = 365nm$	54
3.6	Visualisation des 21 premiers polynômes de Zernike exprimés dans le plan de la pupille d'entrée du système de projection. Chaque polynôme correspond une aberration optique.	55
3.7	Vue en coupe de l'impact du defocus sur l'image aérienne pour deux masques différents (NA=0.57, $\sigma = 0.7$, $\lambda = 365nm$).	56
3.8	Visualisation graphique du calcul des TCC. Lorsque les 3 fonctions ne se superposent pas, l'intégrale est nulle par conséquent le TCC aussi (3.8a). Lorsque les 3 fonctions se superposent (3.8b), l'intégrale devient non nulle (zone bleue).	58
3.9	Comparaison entre les images aériennes simulées par la méthode d'Abbe et d'Hopkins pour un masque type Heavyside à différentes valeurs de cohérence de la source (3.9a). Les courbes sont comparées à un article de la littérature (3.9b).	59
3.10	Comparaison entre les images aériennes simulées par la méthode d'Abbe et d'Hopkins pour un masque type Lignes/Espaces de période 1000nm à différentes valeurs de defocus 3.10a. Les courbes sont comparées à un article de la littérature 3.10b.	61
3.11	Empilement illustrant la géométrie des couches et des indices optiques correspondants lors de l'exposition.	64
3.12	Intensité lumineuse à travers l'épaisseur de résine. L'absorption est visible en noir, les ondes stationnaires en rouge.	66
3.13	Évolution de l'image bulk et latente au cours du temps d'exposition t^{tot} . La ligne rouge sépare les valeurs supérieures à 0.5 de celles inférieures à 0.5.	68
3.14	Visualisation d'un profil résine à différentes étapes de son développement, pour un développement 1D (gauche) et un développement 3D (droite).	71
3.15	Différences entre un développement purement vertical (courbe bleue) et un développement prenant en compte l'horizontalité (courbe orange).	71
3.16	Masque isolé (gauche) et dense (droite). Le rectangle rouge correspond à la maille élémentaire du masque utilisée pour la simulation du profil résine.	72
3.17	Profil résine le long de l'axe x ($y=0$) pour un masque traité en configuration isolée ou dense.	73
4.1	Visualisation d'une cible résine de microlentille et du masque associé. Le découpage en cellules est visible par l'intermédiaire du quadrillage rouge.	76
4.2	Relation entre densité de chrome sur le masque et intensité lumineuse reçue au niveau de la résine. L'aire hachurée correspond aux limites de la densité de chrome qui se traduisent par une limite sur les valeurs d'intensité lumineuse.	77
4.3	Courbes de contraste linéaire (4.4b) et exponentielle (4.4a). La hauteur de résine est normalisée entre 0 et 1.	78

4.4	Profil résine de la grande microlentille LPD son masque associé (courbe de contraste exponentielle (4.4a)).	79
4.5	Profil résine de la configuration SPD/LPD et son masque associé (courbe de contraste exponentielle (4.4a)).	80
4.6	Profil résine d'une microlentille inversée et son masque associé (courbe de contraste linéaire (4.4b)).	80
4.7	Profil résine de la pyramide et son masque associé (courbe de contraste linéaire (4.4b)).	81
4.8	Exemples de masques de piliers à faible 4.8a, moyenne 4.8b et haute 4.8c densité de chrome.	81
4.9	Empilements utilisés pour la résine A et la résine B.	82
4.10	Schéma de principe d'une exposition en FEM [Flack et al., 2002].	83
4.11	Courbes de contraste expérimentales de la résine A sur empilement <i>type I</i> en fonction de la dose (gauche) et du focus (droite).	84
4.12	Courbes de contraste expérimentales de la résine B sur empilement <i>type I</i> en fonction de la dose (gauche) et du focus (droite).	85
4.13	Images CD-SEM de microlentilles denses à différentes doses pour la résine A (ligne supérieure) et la résine B (ligne inférieure) à focus nul sur empilement de <i>type I</i> . La taille de fenêtre est identique pour toutes les images.	87
4.14	Images CD-SEM de microlentilles denses à différentes valeurs de focus pour la résine A (ligne supérieure) et la résine B (ligne inférieure) à dose 1700J/m ² sur empilement de <i>type I</i> . La taille de fenêtre est identique pour toutes les images.	87
4.15	Masques grayscale (ligne supérieure) et images SEM de la résine B avec empilement <i>Type II</i> à focus nul et à dose 1100J/m ² . Les trainées blanches correspondent à des accumulations de charges électroniques combinées à des effets géométriques liés aux ondes stationnaires.	88
4.16	Traitement d'un scan AFM de microlentille isolée : chargement du profil (gauche), recentrement du profil après correction de l'arrière plan (milieu) et interpolation du profil sur la fenêtre jaune.	89
4.17	Coupe horizontale, verticale et diagonales pour le motif de microlentille de la Figure 4.16. La bavure est visible sur la coupe diagonale 2.	90
4.18	Traitement d'un scan AFM de microlentille dense : chargement du profil (gauche), recentrement du profil après correction de l'arrière plan (milieu) et interpolation du profil sur la fenêtre jaune.)	90
4.19	Coupe horizontale, verticale et diagonales pour le motif de microlentille de la Figure 4.18. La bavure est visible sur la coupe diagonale 2.	91
4.20	Traitement d'un scan AFM de pyramide isolée : chargement du profil (gauche), recentrement du profil (milieu) et interpolation sur la fenêtre jaune correspondant au masque (droite).	91
4.21	Coupe horizontale, verticale et diagonales pour un motif de pyramide. Pas de phénomène de «bavure» visible, les profils sont bien symétriques.	92
4.22	Traitement d'un scan AFM de microlentille inversée isolée : chargement du profil (gauche), recentrement du profil (milieu) et interpolation sur la fenêtre jaune correspondant au masque (droite).	92
4.23	Coupe horizontale, verticale et diagonales pour un motif de microlentille inversée. La «bavure» est visible sur la coupe diagonale 2 en orange.	93

4.24	Grandeurs associés à une boîte à moustaches pour la représentation d'une distribution : valeur minimale (Min), premier quartile (Q1), médiane (M), troisième quartile (Q3) et valeur maximale (Max).	96
4.25	Boîtes à moustaches des normes L_2 des profils du groupe 2 avant et après calibration (dose = 1100J/m ² et focus nul).	96
4.26	Boîtes à moustaches des normes L_2 des profils du groupe 2 avant et après calibration (dose = 1300J/m ² et focus nul).	97
4.27	Boîtes à moustaches des normes L_2 des profils du groupe 2 avant et après calibration (dose = 1500J/m ² et focus nul).	97
4.28	Boîtes à moustaches des normes L_2 des profils du groupe 2 avant et après calibration (dose = 1700J/m ² et focus nul).	98
4.29	Boîtes à moustaches des normes L_2 du profil horizontal pour des motifs simulés avec le modèle non calibré (rouge) et le modèle calibré (vert) pour une dose de 1100J/m ²	99
4.30	Boîtes à moustaches des normes L_2 du profil horizontal pour des motifs simulés avec le modèle non calibré (rouge) et le modèle calibré (vert) pour une dose de 1300J/m ²	99
4.31	Boîtes à moustaches des normes L_2 du profil horizontal pour des motifs simulés avec le modèle non calibré (rouge) et le modèle calibré (vert) pour une dose de 1500J/m ²	100
4.32	Boîtes à moustaches des normes L_2 du profil horizontal pour des motifs simulés avec le modèle non calibré (rouge) et le modèle calibré (vert) pour une dose de 1700J/m ²	100
4.33	Impact du paramètre m_{th} sur la description des motifs de microlentille en pixelisations linéaire et exponentielle.	101
4.34	Impact des paramètres r_{min} , r_{max} et n sur la description du motif de microlentille linéaire.	101
4.35	Comparaison des modèles résines pour des motifs de microlentilles denses.	102
4.36	Comparaison des modèles résines pour des motifs de microlentilles isolées.	103
4.37	Comparaison des modèles résines pour des motifs de microlentilles inversées et de pyramides.	104
5.1	Illustration du modèle lithographique direct (flèches continues) et de l'inversion du problème (flèche en pointillés).	108
5.2	Schéma de principe de l'optimisation de masque en deux étapes et de la conversion de P_{tgt} vers I_{tgt}	109
5.3	Masques initiaux pour l'optimisation de la microlentille et de la pyramide.	110
5.4	Illustration des symétries au niveau des masques initiaux. Les plots à l'intérieur de la zone bleue sont suffisants pour reconstruire la totalité du masque. Les plots entourés d'un cercle de même couleur sont identiques d'un point de vue symétrique.	111
5.5	Méthodologie de vérification du minSPACE sur un masque avec l'utilisation de buffers.	114
5.6	Visualisation des profils résines obtenus en développement 1D et 3D en utilisant l'image aérienne initiale $I_{n=0}[n_x, n_y]$ pour le motif de microlentille et de pyramide.	116
5.7	Visualisation des profils résines obtenus en développement 1D et 3D au cours de la correction pour le motif de microlentille et de pyramide.	118
5.8	Vue en coupe du profil cible et de l'image aérienne obtenue pour un profil de microlentille et de pyramide. Le profil rouge correspond au profil simulé avec l'image aérienne pour le modèle de développement 3D.	118

5.9	Masques résultants de l'optimisation de l'image aérienne pour la stratégie <i>libre</i> et <i>fixe</i> pour le motif de microlentille.	119
5.10	Coupe horizontale de l'image aérienne obtenue avec l'optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i> vis-à-vis de l'image aérienne cible.	120
5.11	Comparaison entre les profils horizontaux et diagonaux obtenus avec les masques optimisés et le profil résine cible pour le motif de microlentille.	120
5.12	Masques résultants de l'optimisation de l'image aérienne pour la stratégie <i>libre</i> et <i>fixe</i> pour le motif de pyramide.	121
5.13	Coupe horizontale des images aériennes obtenues avec l'optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i> vis-à-vis de l'image aérienne cible.	121
5.14	Comparaison entre les profils horizontaux et diagonaux obtenus avec les masques optimisés et le profil résine cible pour le motif de pyramide.	122
5.15	Masques résultants de l'optimisation complète pour la stratégie <i>libre</i> et <i>fixe</i> pour le motif de microlentille.	122
5.16	Coupes horizontales et diagonales des profils résines obtenus en optimisation complète pour la stratégie <i>fixe</i> et <i>libre</i> sur le motif de microlentille.	123
5.17	Masques résultants de l'optimisation complète pour la stratégie <i>libre</i> et <i>fixe</i> pour le motif de pyramide.	123
5.18	Coupes horizontales et diagonales des profils résines obtenus avec l'optimisation complète pour la stratégie <i>fixe</i> et <i>libre</i> sur le motif de pyramide.	124
5.19	Vue 3D des scans AFM du motif de microlentille en optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i>	127
5.20	Profils expérimentaux, simulés et cibles pour le motif de microlentille en optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i>	127
5.21	Impact de la dose sur le motif de microlentille en optimisation <i>libre</i>	128
5.22	Images SEM d'une portion de matrice de microlentilles obtenue en optimisation <i>libre</i>	128
5.23	Vue 3D des scans AFM du motif de pyramide en optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i>	129
5.24	Profils expérimentaux, simulés et cibles pour le motif de pyramide en optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i>	129
5.25	Impact de la dose sur le motif de pyramide en optimisation <i>libre</i>	130
5.26	Image SEM du motif de pyramide «enterré» obtenue en optimisation <i>libre</i>	131
5.27	Masques grayscale optimisés pour le motif de microlentille hors-axe avec optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i>	131
5.28	Vue 3D des scans AFM du motif de microlentille hors-d'axe en optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i>	132
5.29	Profils expérimentaux, simulés et cibles pour le motif de microlentille hors-d'axe en optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i>	132
5.30	Impact de la dose sur le motif de microlentille hors-d'axe en optimisation <i>libre</i>	133
5.31	Images SEM d'une portion de matrice du motif de microlentille hors-d'axe obtenue en optimisation <i>libre</i>	133
5.32	Masques grayscale optimisés pour le motif d'ellipse avec optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i>	134
5.33	Vues 3D des scans AFM du motif d'ellipse en optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i>	134
5.34	Profils expérimentaux, simulés et cibles pour le motif d'ellipse en optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i>	135
5.35	Impact de la dose sur le motif d'ellipse en optimisation <i>libre</i>	135
5.36	Images SEM d'une portion de matrice du motif d'ellipses obtenue en optimisation <i>libre</i>	136

5.37	Masques grayscale optimisés pour le motif de microlentille inversée avec optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i> en configuration isolée.	136
5.38	Vues 3D des scans AFM du motif de microlentille inversée en optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i> en configuration isolée.	137
5.39	Profils expérimentaux, simulés et cibles pour le motif de microlentille inversée en optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i> en configuration isolée.	137
5.40	Impact de la dose sur le motif de microlentille inversée en optimisation <i>libre</i>	138
5.41	Masques grayscale optimisés pour le motif de microlentille inversée avec optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i> en configuration dense.	138
5.42	Vues 3D des scans AFM du motif de microlentille inversée en optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i> en configuration dense.	139
5.43	Profils expérimentaux, simulés et cibles pour le motif de microlentille inversée en optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i> en configuration dense.	139
5.44	Images SEM d'une portion de matrice du motif de microlentille inversée obtenue en optimisation <i>libre</i>	140
5.45	Masques grayscale optimisés pour le motif de cône avec optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i>	140
5.46	Vues 3D des scans AFM du motif de cône en optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i>	141
5.47	Profils expérimentaux, simulés et cibles pour le motif de cône en optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i>	141
5.48	Impact de la dose sur le motif de cône en optimisation libre avec $N_{plots} = 9$	142
5.49	Images SEM d'une portion de matrice de cônes obtenue en optimisation <i>libre</i>	142
5.50	Masques grayscale optimisés pour le motif de SPD/LPD en optimisation <i>libre</i> avec $N_{plots} = 17$ (5.50a) et $N_{plots} = 18$ (5.50b).	143
5.51	Vues 3D des scans AFM du motif de SPD/LPD en optimisation <i>fixe</i> et <i>libre</i>	143
5.52	Profils expérimentaux, simulés et cibles pour le motif SPD/LPD en optimisation <i>libre</i> pour $N_{plots} = 17$ et $N_{plots} = 18$	144
5.53	Impact de la dose sur le motif SPD/LPD en optimisation libre avec $N_{plots} = 18$	144
5.54	Images SEM d'une portion de matrice de SPD/LPD obtenue en optimisation libre.	145
6.1	Masque grayscale optimisé à base d'anneaux.	150
6.2	Profils résine obtenus avec le masque de la Figure 6.1.	150
6.3	Approches pour calculer la différence entre le profil résine cible et le profil simulé lors de l'optimisation de masque.	151
7.1	Description des différentes régions et régimes de diffraction selon la distance entre l'ouverture diffractante et la position d'observation z	i
7.2	Géométrie de diffraction. Une ouverture diffractante située dans le plan (ξ, η) en $z = 0$ est illuminée de la gauche vers la droite par une onde monochromatique se propageant parallèlement à l'axe z . Le champ est évalué à une distance z de l'ouverture dans le plan (x, y)	ii
7.3	Impact du defocus sur le motif de microlentille.	iii
7.4	Impact du defocus sur le motif de pyramide.	iii
7.5	Impact du defocus sur le motif de microlentille inversée.	iv
7.6	Impact du defocus sur le motif de cône.	iv
7.7	Impact du defocus sur le motif de microlentille hors-axe.	iv
7.8	Impact du defocus sur le motif d'ellipse.	v
7.9	Impact du defocus sur le motif de SPD/LPD.	v

Liste des tableaux

1.1	Évolution des paramètres des lentilles de projection du fabricant Zeiss. Le suffixe i dans le numéro de modèle indique que le système de projection utilise l'immersion [Bruning, 2007].	26
2.1	Forces et faiblesses des différentes techniques de microlithographie disponibles.	45
3.1	Paramètres optiques du stepper utilisé pendant la thèse.	47
3.2	Résultats de simulation du modèle Abbe et Hopkins pour un masque Heavyside en 1D et 2D en fonction de la valeur de cohérence de la source.	60
3.3	Résultats de simulation du modèle Abbe et Hopkins pour un masque lignes/espaces en 1D et 2D en fonction de la valeur de defocus.	61
3.4	État des lieux des connaissances des paramètres du modèle optique et résine au début de la thèse.	74
4.1	Agencement de masques de microlentilles présents sur FISH.	79
4.2	Étapes de métrologie réalisées sur les différents couples résine/empilement.	84
4.3	Paramètres du modèle de développement fournisseur utilisés comme point de départ de la calibration.	95
4.4	Résultats de la calibration du modèle de développement pour les profils du groupe 1.	95
4.5	Résultats de la calibration du modèle de développement pour le groupe 2.	98
5.1	Temps de calcul du modèle optique et du modèle complet pour différentes discrétisations pour une itération de calcul (moyenne sur 100 itérations).	108
5.2	Nombre de paramètres à optimiser en fonction du type d'optimisation et des considérations de symétries.	111
5.3	Fonctions de coût pour l'optimisation de masque à partir du modèle optique et du modèle complet.	112
5.4	Fonctions de coût avec prise en compte du facteur r_{MRC}	115
5.5	Temps de calcul de l'optimisation de masque avec l'image aérienne et avec le modèle complet.	124
7.1	Temps de calcul du modèle avec et sans prise en compte du defocus pour différents motifs présentant un nombre de pixels différents.	v

Chapitre 7

Annexes

7.1 La diffraction de la lumière

La diffraction correspond à la description du comportement des ondes (lumineuses, sonores, radios...) lorsqu'elles rencontrent un obstacle. Nous ne donnerons pas ici une description détaillée des différentes théories de la diffraction. Nous nous intéresserons ici à la valeur du champ U résultant de la diffraction d'une ouverture illuminée par une onde plane monochromatique se propageant parallèlement à l'axe optique. Différents régimes de diffraction existent selon la distance entre l'ouverture diffractante et le point d'observation du champ. Ces différentes régions sont détaillées sur la Figure 7.1.

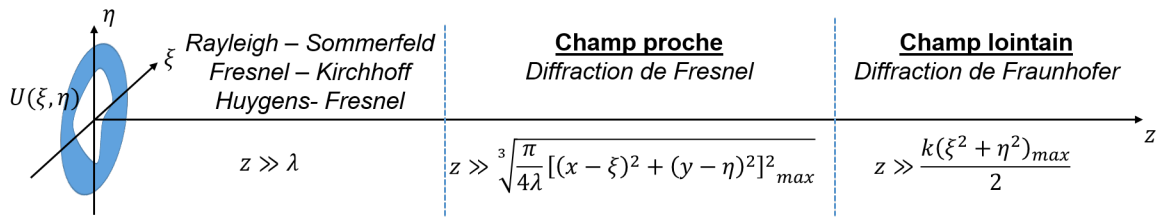


FIGURE 7.1 – Description des différentes régions et régimes de diffraction selon la distance entre l'ouverture diffractante et la position d'observation z .

Nous utiliserons la théorie scalaire de la diffraction. L'approche scalaire suppose que le milieu de propagation des ondes est diélectrique, linéaire, isotrope, homogène et non dispersif. De plus, le trajet des rayons lumineux doit être suffisamment proche de l'axe optique afin que l'hypothèse paraxiale soit validée. Il est possible de démontrer à partir des équations de Maxwell que les composantes du champ électrique et magnétique se comportent identiquement en suivant une équation d'onde scalaire. Le champ U à la position P et au temps t vérifie :

$$\nabla^2 U(P, t) - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial U(P, t)}{\partial t} = 0 \quad (7.1)$$

Où n représente l'indice optique du milieu de propagation et c la vitesse de la lumière dans le vide.

Dans le cas de la diffraction par une ouverture, le champ électrique et magnétique sont modifiées aux bords de l'ouverture, là où la lumière interagit avec le matériau. L'approche scalaire perd en précision au niveau de ces conditions aux limites. La taille de l'ouverture relativement à la longueur d'onde d'illumination est importante. Plus l'ouverture sera grande, plus les effets de couplage sur les bords seront faibles. Cette condition correspond au cas où les

angles de diffraction sont faibles.

La Figure 7.2 ci-dessous présente un cas de diffraction par une ouverture illuminée par une onde plane. Dans le cadre de l'approche scalaire de la diffraction nous allons détailler plusieurs approches exprimant le champ résultant de l'interaction entre l'onde plane et l'ouverture diffractante à différentes distances d'observation.

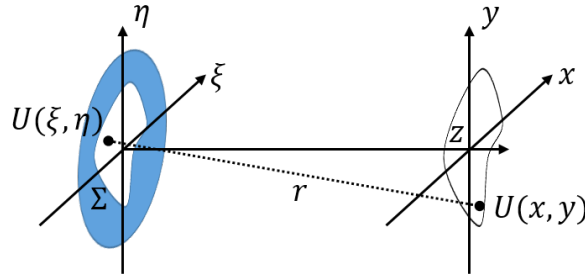


FIGURE 7.2 – Géométrie de diffraction. Une ouverture diffractante située dans le plan (ξ, η) en $z = 0$ est illuminée de la gauche vers la droite par une onde monochromatique se propageant parallèlement à l'axe z . Le champ est évalué à une distance z de l'ouverture dans le plan (x, y) .

Principe d'Huygens-Fresnel

En supposant que $z \gg \lambda$.

$$U(x, y) = \frac{z}{j\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) \frac{\exp(jkr)}{r} d\xi d\eta \quad (7.2)$$

où $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ représente la constante de propagation et $r = \sqrt{z^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}$

L'équation (7.2) n'étant pas facilement calculable, il est possible de la simplifier en se plaçant à une distance suffisamment éloignée de l'objet diffractant. On distingue particulièrement deux zones selon l'éloignement : le champ proche et le champ lointain. L'expression du champ dans ces deux zones est gouvernée respectivement par les équations de Fresnel et de Fraunhofer.

Diffraction de Fresnel

La formule de diffraction de Fresnel est valable en champ proche (cf. Figure 7.1).

$$U(x, y) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{j\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} \iint_{-\infty}^{\infty} \left[U(\xi, \eta) e^{j\frac{k}{2z}(\xi^2+\eta^2)} \right] e^{-j\frac{2\pi}{\lambda z}(x\xi+y\eta)} d\xi d\eta \quad (7.3)$$

Le champ en (x, y) est directement proportionnel à la transformée de Fourier du champ au niveau de l'ouverture multiplié par un terme de phase quadratique exponentielle évaluée aux fréquences $f_x = \frac{x}{\lambda z}$ et $f_y = \frac{y}{\lambda z}$.

Diffraction de Fraunhofer

La formule de diffraction de Fraunhofer est valable en champ lointain (cf. Figure 7.1).

$$U(x, y) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{j\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} \iint_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda z}(x\xi+y\eta)} d\xi d\eta \quad (7.4)$$

Le champ en (x, y) est directement proportionnel à la transformée de Fourier du champ au niveau de l'ouverture évaluée aux fréquences $f_x = \frac{x}{\lambda z}$ et $f_y = \frac{y}{\lambda z}$.

7.2 Prise en compte du defocus

Implémentée tardivement, la prise en compte du defocus de l'image aérienne dans l'épaisseur de résine au cours de l'exposition n'a pas été utilisé pour créer ORCA. Dans cette section, les profils présentés au chapitre 5 sont simulés à nouveau en prenant en compte le defocus par l'intermédiaire de l'équation (3.20) (page 64) (courbes rouges). Le modèle ne prenant pas en compte le defocus est tracé en pointillés noir. Les paramètres du développement sont ceux calibrés au chapitre 4.

Les Figures sont limités aux optimisations *libres* à la dose de 1500J/m².

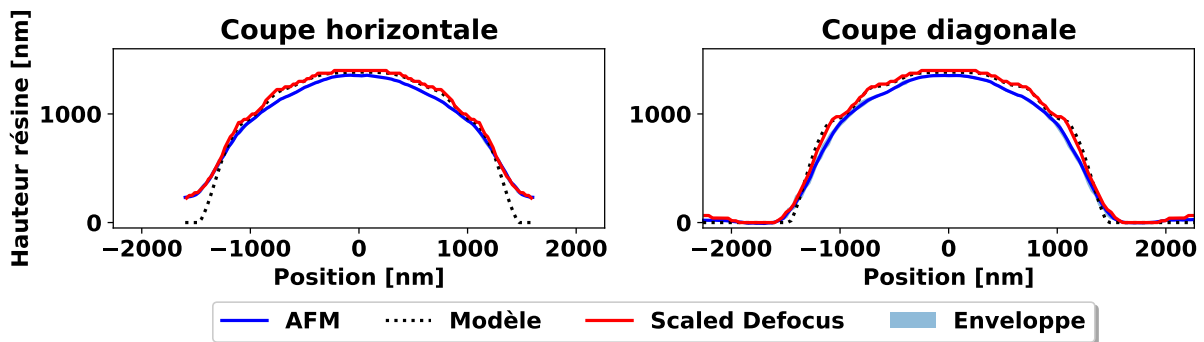


FIGURE 7.3 – Impact du defocus sur le motif de microlentille.

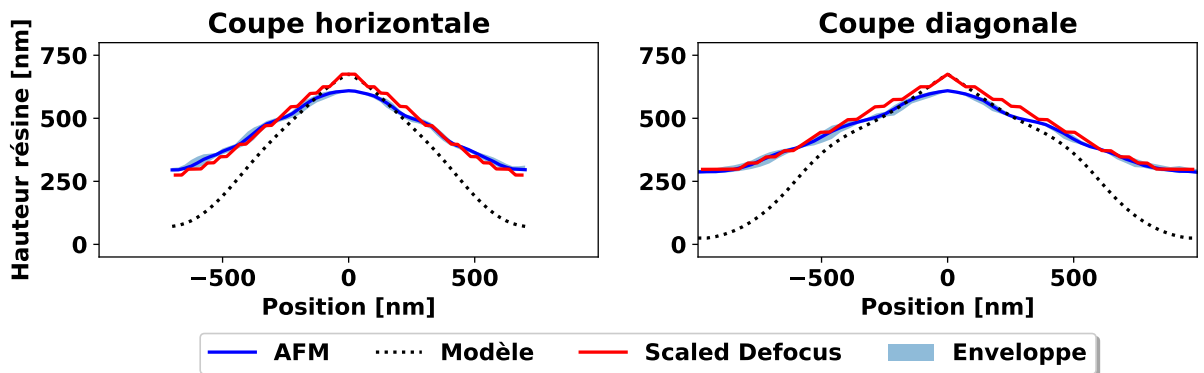


FIGURE 7.4 – Impact du defocus sur le motif de pyramide.

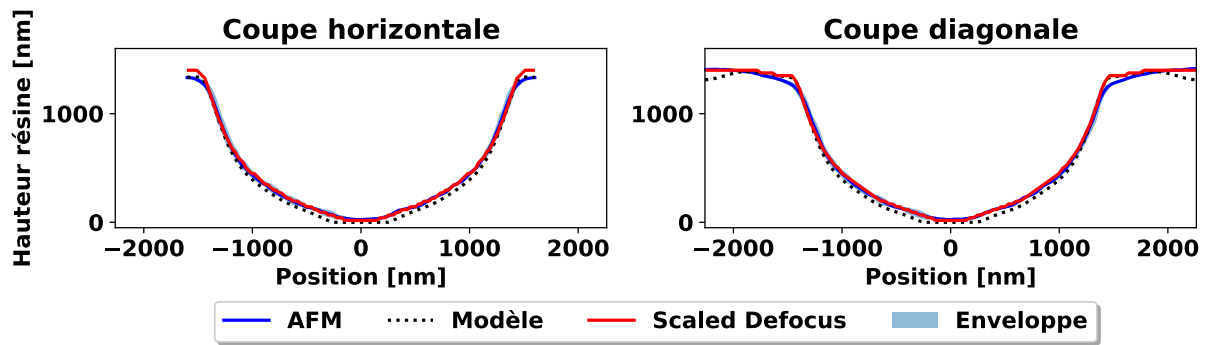


FIGURE 7.5 – Impact du defocus sur le motif de microlentille inversée.

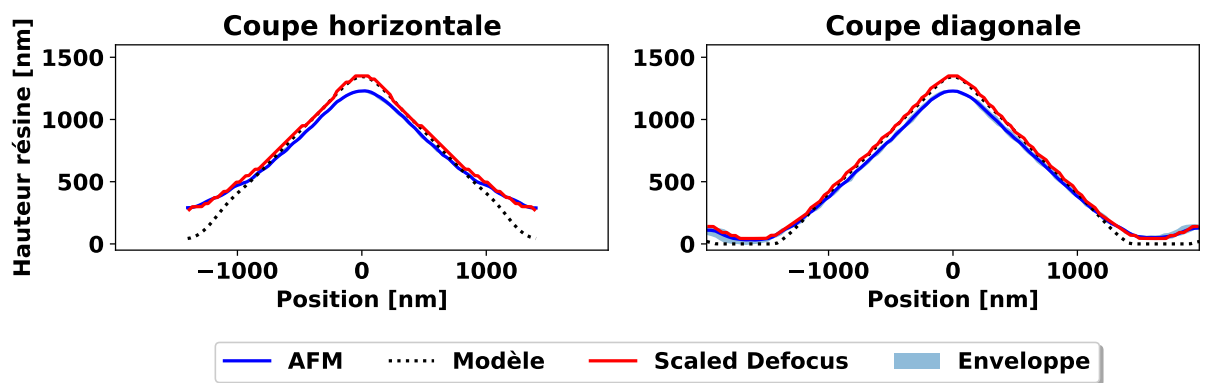


FIGURE 7.6 – Impact du defocus sur le motif de cône.

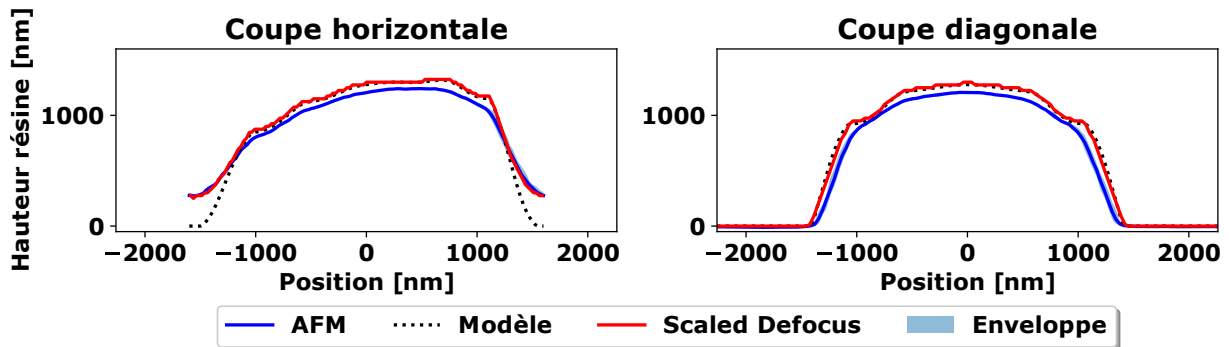


FIGURE 7.7 – Impact du defocus sur le motif de microlentille hors-axe.

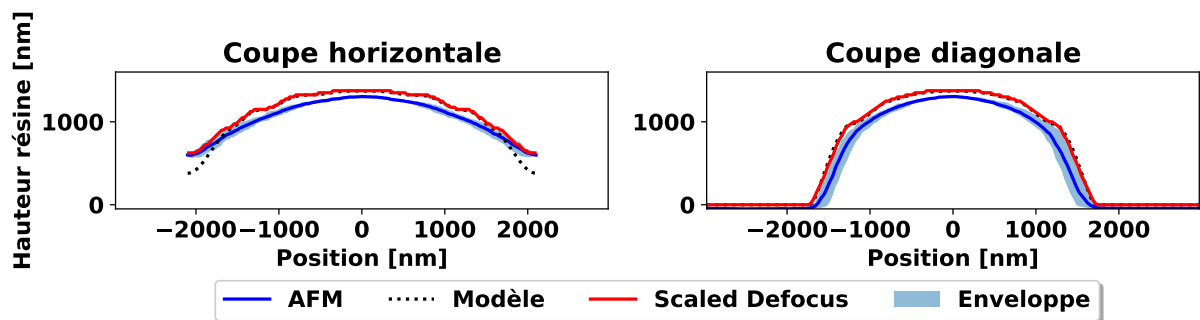


FIGURE 7.8 – Impact du defocus sur le motif d'ellipse.

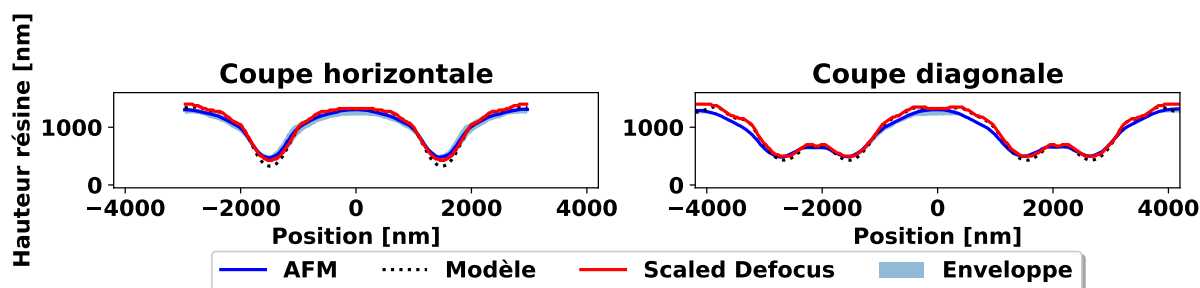


FIGURE 7.9 – Impact du defocus sur le motif de SPD/LPD.

La prise en compte du defocus permet clairement de mieux décrire les bords de motifs et les effets de pontage avec les voisins. Sur le premier micromètre d'épaisseur de résine, les deux modèles fournissent des résultats similaires. Ce sont sur les 500 derniers nanomètres de résine (les plus profonds), que les deux modèles diffèrent : le defocus atteint ne devient plus négligeable. Le Tableau 7.1 ci dessous regroupe les temps de calcul nécessaires pour certains motifs en rappelant le nombre de pixels n_x :

TABLE 7.1 – Temps de calcul du modèle avec et sans prise en compte du defocus pour différents motifs présentant un nombre de pixels différents.

Motif	n_x	Sans scaled defocus [s]	Avec scaled defocus [s]
Microlentille	127	11.2	81
Cône	111	8.8	60
Pyramide	55	1.45	17.18
SPD-LPD	237	40.48	497

Les résultats présentés ici peuvent encore être améliorés en réalisant une nouvelle calibration du modèle de développement prenant en compte le defocus.

7.3 Caractéristiques de la machine utilisée au cours de la thèse

- Windows 10 64bits
- GPU : AMD Radeon R5 240
- CPU : Intel Core i5 4590 @3.3GHz
- RAM : 8GO @1600MHz

Résumé

La réalisation de microstructures complexes est devenue un des axes majeurs de recherche en microélectronique depuis le ralentissement de la *loi de Moore* et l'avènement de celle de *More Than Moore*. La réalisation de ces structures dans un cadre industriel doit répondre à des contraintes de temps, de coût et de reproductibilité. C'est notamment le cas des microlentilles utilisées dans les capteurs d'images CMOS.

La lithographie grayscale est une méthode de microfabrication basée sur les techniques et les équipements utilisés en lithographie optique conventionnelle. Cette approche consiste à exposer une résine photosensible de faible contraste à une dose variable spatialement. La valeur de la dose permet de contrôler la hauteur de résine restante après l'étape de développement. Cette dose variable est le résultat de l'exposition d'un masque composé de motifs définis sous la limite de résolution de l'équipement de lithographie. La lithographie grayscale permet de générer des structures d'une grande variété : pyramides, lentilles, réseaux de diffractions... Lorsque les dimensions de la structure visée sont de l'ordre de quelques dizaines de micromètres à plusieurs centaines de micromètres une description simplifiée des phénomènes optiques et résines mis en jeu est suffisante pour générer le masque grayscale.

Ce travail de thèse explore les possibilités offertes par la lithographie grayscale lorsque les dimensions horizontales et verticales des microstructures sont inférieures à $3\mu\text{m}$. Une approche rigoureuse permettant de modéliser la lithographie grayscale a été développée en remplacement des approches simplifiées désormais inadéquates. En se basant sur ce modèle, une méthodologie innovante d'optimisation de masque grayscale a été construite. Les résultats expérimentaux obtenus avec cette méthode démontrent sa capacité à adresser les formes souhaitées avec des dimensions comprises entre $1\mu\text{m}$ et $3\mu\text{m}$.

Abstract

Patterning of complex microstructures has become one of the most important line of research since the decay of the *Moore law* and the rise of the *More Than Moore law*. The patterning of such structures in an industrial framework must be compatible with timing, cost of ownership and reproductibility constraints. An example are the microlens used in CMOS image sensors.

Grayscale lithography is a microfabrication technique based on conventional optical lithography approaches and equipments. This method consists in exposing a low contrast photoresist to a spatially variable dose. The local dose controls the remaining resist height after development. The dose variation is generated using a photomask designed with subresolution features designed below the resolution limit of the stepper. Grayscale lithography can pattern a wide variety of structures : pyramids, lens, gratings... A simplified description of the optical and resist phenomena can be used to design an appropriate photomask when dimensions of the microstructure are large enough (between ten to hundred of micrometers).

The present thesis explores the possibilities of grayscale lithography to pattern microstructures with lateral and vertical dimensions smaller than $3\mu\text{m}$. A rigorous grayscale lithography model has been developed as a substitution to simplified models. Using this model, an innovative mask data-preparation algorithm has been build. Experimental results confirm its capacity to adress a large variety of microstructures with dimensions between $1\mu\text{m}$ to $3\mu\text{m}$.