

## Sommaire

<b>Résumé .....</b>	<b>5</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>11</b>
<b>Chapitre 1 Généralités sur la microélectronique .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 La microélectronique .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2 La technologie CMOS.....</b>	<b>18</b>
1.2.1 Structure et fonctionnement d'un transistor MOS.....	19
1.2.2 Le circuit intégré CMOS .....	20
1.2.3 Les règles de dessin d'un circuit intégré.....	21
<b>1.3. Les étapes de fabrication d'un circuit intégré.....</b>	<b>22</b>
<b>1.4. Les bases de la lithographie optique.....</b>	<b>24</b>
1.4.1 Principe de la lithographie optique.....	24
1.4.1.1 Système d'illumination .....	25
1.4.1.2 Le masque .....	26
1.4.1.3 Le système optique de projection.....	27
1.4.1.4 Les résines photosensibles.....	27
1.4.2 La formation de l'image aérienne .....	28
1.4.3 Les performances lithographiques .....	32
1.4.3.1 La résolution.....	32
1.4.3.2 Le contraste ou le logarithme de la pente de l'image aérienne ?.....	36
1.4.3.3 Fenêtre de procédé .....	37
1.4.3.4 Le facteur d'erreur du masque.....	39
<b>1.5. Les techniques améliorant la résolution .....</b>	<b>40</b>
1.5.1 Diminution de la longueur d'onde .....	40
1.5.2 Augmentation de l'ouverture numérique.....	40
1.5.3 Diminution du facteur $k_1$ .....	42
1.5.3.1 Modification de l'illumination.....	42
1.5.3.2 Corrections des effets de proximité optique .....	43
1.5.3.3 Les masques à décalage de phase.....	45
<b>1.6 Quelle technique d'impression pour les circuits avancés (22nm et au-delà) ?..</b>	<b>46</b>
1.6.1 La lithographie extrême ultraviolet .....	46
1.6.2 La lithographie par double impression .....	47

<b>1.7 Conclusion .....</b>	<b>49</b>
<b>Chapitre 2 La lithographie par double impression .....</b>	<b>51</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>53</b>
<b>2.1. Procédés lithographiques pour la double impression .....</b>	<b>53</b>
2.1.1 Impression par décomposition directe.....	54
2.1.1.1 Principe .....	54
2.1.1.2 Implication des règles de dessin.....	57
2.1.2 Impression par décomposition indirecte.....	58
2.1.2.1 Principe .....	58
2.1.2.2 Implication des règles de dessin.....	61
2.1.3 Comparaison des procédés .....	63
<b>2.2 Théorie de la décomposition pour la double impression .....</b>	<b>66</b>
2.2.1 Génération d'un graphe à partir d'un dessin de circuit.....	66
2.2.2 Décomposition d'un graphe.....	67
2.2.1 Les conflits de décomposition .....	70
2.2.1.1 Présentation du problème .....	70
2.2.1.2 Comment éviter les conflits de décomposition ?.....	72
<b>2.3. Décomposition du niveau contacts.....</b>	<b>77</b>
<b>2.4 Objectifs de la thèse .....</b>	<b>81</b>
<b>Chapitre 3 Analyse de la figure de diffraction et son influence sur les performances lithographiques.....</b>	<b>83</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>85</b>
<b>3.1 Interaction des ondes planes monochromatiques .....</b>	<b>85</b>
3.1.1. Interaction de deux ondes .....	85
3.1.2. Interaction de n ondes .....	89
<b>3.2 Analyse de la figure de diffraction pour un réseau de lignes.....</b>	<b>90</b>
3.2.1. Evolution des interactions entre les ordres de diffraction .....	90
3.2.1.1. Pas d'interaction .....	91
3.2.1.2. Introduction des interférences à deux ordres .....	91
3.2.1.3. Introduction des interférences à trois ordres .....	92
3.2.2. La surface de recouvrement.....	93
3.2.3. Evolution de la surface de recouvrement en fonction du pas du réseau .....	95
<b>3.3 Figure de diffraction pour un réseau de contacts .....</b>	<b>99</b>
<b>3.4 Evolution de la surface de recouvrement pour un réseau de contacts .....</b>	<b>102</b>
3.4.1. Evolution en fonction du pas du réseau .....	102

3.4.2. Evolution en fonction de l'orientation du réseau .....	104
<b>3.5 Méthode de calcul des surfaces de recouvrement .....</b>	<b>112</b>
3.5.1. Avec une source prédéfinie .....	113
3.5.2. Avec une source pixelisée .....	115
<b>3.6 Conclusion .....</b>	<b>118</b>
<b><i>Chapitre 4 Technique de décomposition optique : Application au niveau contacts.....</i></b>	<b><i>119</i></b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>121</b>
<b>4.1. Définition des régions limitées pour le niveau contacts .....</b>	<b>121</b>
<b>4.2. Détection des contacts limités .....</b>	<b>126</b>
<b>4.3. Application pour la double impression du niveau contacts du nœud 22nm ...</b>	<b>128</b>
4.3.1. Flot d'optimisation de la décomposition du niveau contacts .....	128
4.3.2. Mise en place d'une décomposition optique.....	132
<b>4. 4. Comparaison de l'impression par décomposition géométrique et optique .....</b>	<b>136</b>
4.4.1. EPE minimal.....	138
4.4.2. EPE maximal .....	140
<b>4.5. Conclusion .....</b>	<b>143</b>
<b><i>CONCLUSION GENERALE .....</i></b>	<b><i>145</i></b>
<b><i>ANNEXE 1 .....</i></b>	<b><i>149</i></b>
<b><i>ANNEXE 2 .....</i></b>	<b><i>153</i></b>
<b><i>ANNEXE 3 .....</i></b>	<b><i>169</i></b>
<b><i>BIBLIOGRAPHIE .....</i></b>	<b><i>173</i></b>

# INTRODUCTION GENERALE

Ordinateur, téléphone portable, lecteur MP4, appareil photo numérique, console de jeux, voiture, GPS ... Quel est le point commun entre tous ces appareils qui envahissent aujourd'hui notre quotidien ? La réponse est : la puce microélectronique appelée aussi circuit intégré. Depuis leur apparition, les circuits intégrés n'ont cessé de se miniaturiser, de se complexifier et de remplir des fonctions de plus en plus ambitieuses. Ils ont été conçus à l'origine pour effectuer des opérations de calcul. Aujourd'hui, on les trouve partout : dans nos maisons, nos voitures, nos loisirs, etc. Cette fulgurante évolution repose continuellement sur l'augmentation exponentielle de la densité d'intégration (i.e. le nombre de transistors par puce) résultat de la miniaturisation, de plus en plus poussée, des dimensions des transistors. C'est ce qui a permis une amélioration des performances électriques des puces et donc un développement sans précédent de l'industrie de la microélectronique.

L'étape technologique clef de l'industrie de la microélectronique a toujours été la lithographie optique, étape définissant la densité maximale des motifs imprimables sur une plaquette. Elle consiste à transférer dans un film de résine photosensible déposé sur le substrat de silicium, l'image d'un circuit, dessiné sur un masque, à travers un système de projection optique. La sensibilisation de la résine s'effectue grâce à une source de lumière ultraviolette monochromatique. La vitesse du circuit imprimé et la densité d'intégration dépendent de la taille de la dimension minimale du circuit que la lithographie est capable de reproduire. En effet, l'intégration permet aux circuits à surface égale de réaliser des tâches plus complexes, plus rapidement et pour un coût de fabrication similaire. La dimension minimale des circuits est généralement définie par la largeur de la grille de poly-silicium du transistor MOS.

Dans un système lithographique, la réduction des dimensions des transistors est liée à la longueur d'onde d'exposition et à l'ouverture numérique du système optique de projection. La diminution de la longueur d'onde ainsi que l'augmentation de l'ouverture numérique permettent de diminuer les dimensions critiques. Depuis une vingtaine d'années, les lithographes ont repoussé les limites de la lithographie optique en résolvant des motifs en dessous de la longueur d'onde d'exposition. Ils ont pour cela développé différentes techniques dites RET (de l'anglais *Resolution Enhancement Techniques*) permettant d'améliorer la résolution lithographique.

Cependant, nous approchons des limites physiques et technologiques des outils lithographiques actuels rendant l'impression des circuits des nœuds technologiques avancés (22nm et en-dessous) impossible. La lithographie Extrême Ultraviolet se présente aujourd'hui comme une technique permettant de diminuer la résolution des systèmes lithographiques en réduisant la longueur d'onde d'exposition. Cette technique permet d'imprimer des circuits dessinés en dessous de la limite de résolution des outils lithographiques actuels. Cependant, à l'heure actuelle, la lithographie Extrême Ultraviolet n'est pas suffisamment mature pour la production en masse. Afin de pouvoir rester dans la course vers la miniaturisation, la lithographie optique par double impression est proposée aujourd'hui comme une solution alternative en attendant que la lithographie Extrême Ultraviolet soit prête pour remplir les exigences industrielles. En utilisant la lithographie optique par double impression, la réalisation des circuits dessinés en dessous de la limite de résolution des outils lithographiques actuels est aujourd'hui possible.

Le principe de cette technique consiste à séparer les motifs du dessin d'un circuit intégré et de les placer sur deux masques différents. Le but de cette première étape, connue sous le nom de décomposition ou de coloriage, est d'élargir la distance entre les motifs sur chacun des deux masques d'exposition. Ainsi, l'impression des deux masques l'un à la suite de l'autre, tout en garantissant un bon alignement entre eux, permet de reproduire les motifs souhaités sur plaquette de silicium. La décomposition des motifs d'un circuit intégré est un challenge majeur de la technique de double impression. C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail de cette thèse.

**Le premier chapitre** rappelle les différents niveaux technologiques constituant un transistor MOS et un circuit intégré CMOS. Il décrit aussi les différentes étapes de conception d'un circuit intégré, plus particulièrement la lithographie optique. Nous verrons dans ce chapitre les différentes techniques ayant permis de repousser la résolution lithographique pendant ces 30 dernières années. Finalement, nous aborderons les techniques dédiées à l'impression des circuits intégrés dessinés en dessous de la résolution lithographique (22nm et au-delà).

**Le deuxième chapitre** décrit de manière plus détaillée la lithographie par double impression. Nous aborderons d'abord les différents procédés lithographiques utilisés par la double impression.

Puis, nous présenterons le principe des algorithmes de décomposition, le cœur de la technique de double impression. Nous verrons que toutes les méthodes de décomposition présentes sur le marché actuellement sont basées sur le pas minimal pouvant être résolu lors d'un procédé lithographique. Enfin nous présenterons les objectifs de cette thèse.

**Le troisième chapitre** est dédié au développement d'une nouvelle méthode de décomposition dite décomposition optique. La décomposition optique est différente de celle présentée dans le chapitre 2 car elle est basée sur l'analyse de la figure de diffraction d'un réseau de motifs. La décomposition optique permet de déterminer d'une part les pas et les configurations de motifs (s'ils existent) dans lesquels il n'y pas de formation d'image et d'autre part, les pas et les configurations de motifs dans lesquels le contraste de l'image formée peut être dégradé. Dans ce chapitre, nous présenterons le cadre théorique de la décomposition optique.

**Le quatrième chapitre** est consacré à l'application de la nouvelle méthode de décomposition pour la décomposition du niveau contacts d'un circuit intégré du nœud technologique 22nm. Un nouveau flot de décomposition a été développé et est présenté dans ce chapitre. Les résultats de simulation montrent que la décomposition optique, en plus d'élargir les espacements entre les contacts et de relâcher la densité entre les deux masques, elle permet aussi d'augmenter la qualité d'impression des contacts sur les deux masques générés lors de la double impression.

**Rapport-Gratuit.com**

# **Chapitre 1**

## **Généralités sur la microélectronique**



## Sommaire

<b>Chapitre 1 Généralités sur la microélectronique .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 La microélectronique .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2 La technologie CMOS .....</b>	<b>18</b>
1.2.1 Structure et fonctionnement d'un transistor MOS.....	19
1.2.2 Le circuit intégré CMOS .....	20
1.2.3 Les règles de dessin d'un circuit intégré.....	21
<b>1.3. Les étapes de fabrication d'un circuit intégré .....</b>	<b>22</b>
<b>1.4. Les bases de la lithographie optique.....</b>	<b>24</b>
1.4.1 Principe de la lithographie optique.....	24
1.4.2 La formation de l'image aérienne .....	28
1.4.3 Les performances lithographiques .....	32
<b>1.5. Les techniques améliorant la résolution .....</b>	<b>40</b>
1.5.1 Diminution de la longueur d'onde .....	40
1.5.2 Augmentation de l'ouverture numérique.....	40
1.5.3 Diminution du facteur $k_1$ .....	42
<b>1.6 Quelle technique d'impression pour les circuits avancés (22nm et au-delà) ?..</b>	<b>46</b>
1.6.1 La lithographie extrême ultraviolet .....	46
1.6.2 La lithographie par double impression .....	47
<b>1.7 Conclusion .....</b>	<b>49</b>

# INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de situer cette thèse dans le contexte technologique de la microélectronique. Nous présenterons les différents niveaux technologiques constituant un transistor MOS et un circuit intégré. Par la suite, nous verrons les différentes étapes de réalisation d'un circuit intégré, plus particulièrement la lithographie optique. Nous évoquerons les différentes méthodes ayant permis d'améliorer la résolution de la lithographie optique pendant ces 30 dernières années. Finalement, nous aborderons les techniques dédiées à l'impression des circuits intégrés avancés (22nm et au-delà) afin d'introduire le sujet de cette thèse, à savoir la lithographie par double impression.

## 1.1 La microélectronique

Le début de la microélectronique remonte à 1947 avec la conception du premier transistor bipolaire sur un monocristal de germanium par W.B.Schockley (1). Cette invention se poursuit avec la commercialisation du premier transistor en 1952 par les laboratoires *Bell* (2). Sept ans plus tard, en 1959, le premier circuit intégré, appelé aussi puce électronique, est réalisé par J. Kilby de la compagnie *Texas Instruments* (3). Ce premier circuit intégré contenait, sur une même surface de silicium, un transistor, quatre diodes et quelques résistances. En 1968, Robert Noyce met au point une technologie permettant la réalisation de circuits intégrés utilisant des transistors MOS (Metal Oxyde Semi-conducteur) (4). L'association de différents transistors MOS de conduction différente (type N et P) permet la réalisation de différentes fonctions logiques. Cette technologie appelée CMOS (semi-conducteur d'oxyde métallique complémentaire) est à l'origine du développement industriel des circuits intégrés. En 1971, la compagnie *Intel* commercialise le premier microprocesseur comportant 2300 transistors sur une puce de  $6\text{cm}^2$  (5). En 2011, les microprocesseurs proposés par *Intel* comptent plus de 2 milliards de transistors sur une puce  $1\text{cm}^2$  (6).

L'industrie de la microélectronique progresse continuellement grâce à la réduction des dimensions des transistors MOS qui permet :

- Une augmentation de la vitesse de fonctionnement d'un dispositif qui est inversement proportionnelle à sa dimension.
- Une augmentation de la densité d'intégration, correspondant au nombre de composants par puce.
- Une réduction des coûts de fabrication.

En 1965, Gordon Moore fait un constat technico-économique, appelé depuis « loi de Moore » (7) qui prédit que la densité d'intégration des circuits intégrés, pour une même unité de surface, double tous les 18 mois pour un même coût de production. Cette loi est la ligne conductrice de l'industrie des semi-conducteurs et des travaux de toute une génération de chercheurs et d'ingénieurs micro électroniciens. La miniaturisation des circuits intégrés est guidée par une feuille de route internationale, appelée ITRS (8) (de l'anglais *International Technology Roadmap for Semiconductor*), éditée et revue régulièrement par des experts industriels. L'ITRS donne des spécifications en termes de performances, de coût des systèmes microélectroniques et de dimensions critiques. La notion de dimension critique est centrale dans la feuille de route de la microélectronique au point que cette industrie a pris l'habitude de nommer chaque nœud technologique par sa dimension critique caractéristique. Un nœud technologique est défini comme étant la moitié du pas (ligne + espacement) de la structure la plus dense dans le circuit. Par exemple, l'ITRS prévoit pour 2013 des dimensions de 32nm de demi-pas pour une cellule mémoire DRAM (*Dynamic Random Access Memory*) (9), ce qui signifie que la période des plus denses structures dans cette cellule sera de 64nm. La miniaturisation des composants prédite par loi de Moore a permis l'expansion de la microélectronique depuis des dizaines d'années. Cependant, cette miniaturisation entraîne l'apparition de difficultés technologiques de plus en plus nombreuses à chaque réduction dimensionnelle (utilisation de nouvelles techniques de lithographie, de gravure,...). Des innovations, notamment dans le procédé lithographique (réduction de la longueur d'onde, augmentation de l'ouverture numérique, techniques d'amélioration de la résolution) ont permis de résoudre ces difficultés technologiques. Toutefois, ces innovations ont un coût qui limitera un jour le développement de la microélectronique (10). En effet, l'aspect économique de la production des circuits intégrés est un paramètre influant dans la chaîne de production. Aujourd'hui, le coût de la lithographie représente 35% du coût de fabrication des puces. L'augmentation incessante du coût des machines lithographiques est reconnue comme étant un des facteurs limitant la progression des générations technologiques.

## 1.2 La technologie CMOS

La technologie CMOS est actuellement la technologie dominante dans le domaine de la microélectronique. Beaucoup de composants microélectroniques sont basés sur la technologie CMOS, comme par exemple, les microprocesseurs, les mémoires ou encore certains circuits intégrés numériques opérant en logique booléenne.

Le transistor MOS est l'élément de base de ces circuits. Son succès est dû à sa faible consommation en énergie et à ses bonnes performances en termes de fréquence (rapidité).

Dans cette section, nous aborderons d'abord les différents niveaux constituant un transistor de type MOS et son principe de fonctionnement. Puis nous verrons comment se fait le passage du transistor de type MOS au circuit intégré de type CMOS. Enfin, nous définirons les règles de dessin d'un circuit intégré.

### 1.2.1 Structure et fonctionnement d'un transistor MOS

Un transistor MOS, schématisé en Figure 1.1, est généralement constitué :

- D'une grille, l'électrode de commande du transistor, portant le numéro 3 sur la Figure 1.1.
- D'une couche mince d'oxyde de grille qui sépare la grille de la zone active du substrat de silicium, repérée par le numéro 4 sur la Figure 1.1.
- Une source et un drain qui correspondent à des réservoirs de charges, ce sont des régions de la zone active dopées N (excès d'électrons) dans le cas d'un transistor n-MOS ou P (excès de trous) dans le cas d'un transistor p-MOS. La source et le drain sont indiqués par les numéros 5 et 6 respectivement sur la Figure 1.1.
- Des tranchées d'isolation STI (de l'anglais *Shallow Trench Isolation*) qui servent à isoler électriquement les transistors entre eux. Elles portent le numéro 2 sur la Figure 1.1.
- Des espaceurs situés de chaque côté de la grille qui permettent d'une part d'auto-aligner la grille avec les source/drain lors du procédé de réalisation, et d'autre part de limiter la diffusion des porteurs de charges (électrons ou trous) sous la grille. Les espaceurs sont repérés par le numéro 9 sur la Figure 1.1.

- ① Zone active
- ② Isolation STI
- ③ Grille
- ④ Oxyde de grille
- ⑤ ⑥ Source et Drain
- ⑦ ⑧ Extension Source-Drain
- ⑨ Espaceurs

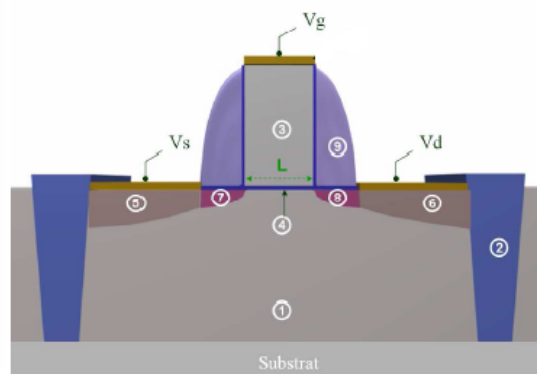


Figure 1. 1 Représentation en coupe d'un transistor MOS et description de ses éléments principaux (11)

Le transistor permet le passage ou non d'un courant suivant la tension électrique appliquée sur la grille, c'est un transistor à effet de champ (12). En pratique, la source et le substrat sont reliés à la masse (potentiel nul). Le drain est porté à un potentiel ( $V_d$ ) supérieur à celui de la source ( $V_s$ ), créant ainsi un champ électrostatique entre la source et le drain. La tension ( $V_g$ ) appliquée à la grille va moduler le courant de charges produit entre la source et le drain. Pour une description plus détaillée du principe de fonctionnement d'un transistor MOS, le lecteur pourra faire référence à l'ouvrage de S.M. Sze (13).

## 1.2.2 Le circuit intégré CMOS

Un circuit intégré CMOS connecte des transistors n-MOS et des transistors p-MOS sur un même substrat dans le but de réaliser des fonctions logiques (OR, XOR, NAND,...) (14). Un circuit intégré se compose de plusieurs niveaux qui peuvent être décomposés en deux parties : la partie Front End Of Line (FEOL) et la partie Back End Of Line (BEOL), comme montré en Figure 1.2. La partie Front End Of Line est celle située au plus près de la plaquette de silicium. Elle est nommée active car elle contient tous les niveaux définissant les transistors. La partie Back End Of Line est nommée passive car elle contient tous les niveaux d'interconnexion métalliques qui permettent d'alimenter et de commander la partie active du circuit. Les interconnexions sont séparées en plusieurs niveaux horizontaux, appelés « Niveau de Métal x » ou « Métal x » pour le niveau x. Un niveau Métal est constitué de lignes métalliques horizontales et deux niveaux de Métal sont reliés par des interconnexions verticales appelées « via ».

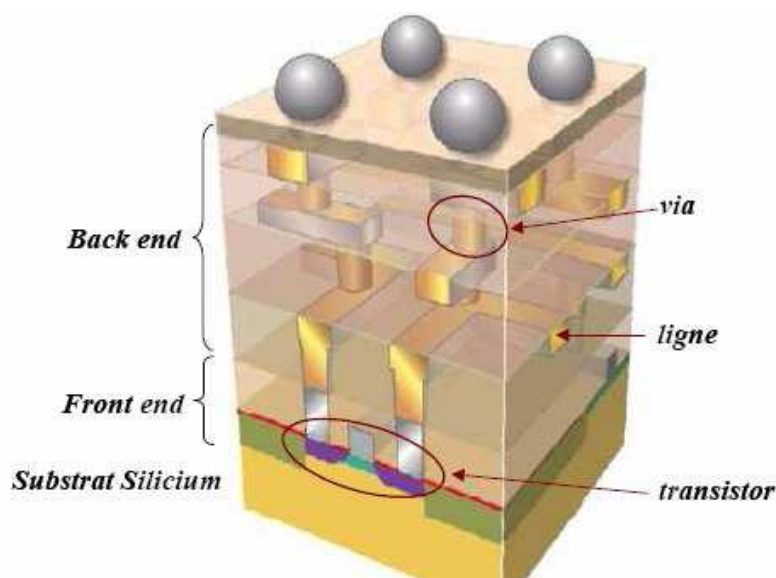


Figure 1. 2 Représentation schématique d'un circuit intégré (15)

### 1.2.3 Les règles de dessin d'un circuit intégré

La conception d'un circuit intégré commence par la définition de son schéma électrique (16). Lors de cette étape, tous les composants électriques constituant le circuit ainsi que leurs connexions sont définis en respectant la densité et la fonctionnalité du circuit (logique, mémoire, ...). Pour chaque composant électrique constituant le circuit intégré, il existe des bibliothèques contenant toutes les informations concernant la dimension, les courants et les fréquences de fonctionnement du circuit intégré. Grâce à des logiciels, la compilation du schéma électrique du circuit intégré avec ses bibliothèques associées traduit le circuit intégré en format industriel (de l'anglais *layout*) contenant plusieurs niveaux (de l'anglais *layers*) (17). Chaque niveau du circuit intégré est représenté par des dessins en deux dimensions qui sont des polygones décrivant les motifs du niveau en question. Les règles de dessin doivent obéir à un ensemble de règles géométriques très précises en termes de taille, espacement et recouvrement. La Figure 1.3, donne quelques valeurs caractéristiques des règles de dessin pour la technologie CMOS du nœud 45nm. La grille représentée en violet recouvre la zone active sur laquelle vont être défini les contacts source et drain. On crée ainsi un transistor MOS. Les contacts source, drain et grille sont ensuite reliés par un niveau de métal (représenté en marron) qui va les connecter aux autres transistors du circuit intégré CMOS. Pour chaque nœud technologique, les règles de dessin de chaque niveau du circuit intégré sont fixées. Celles-ci doivent impérativement être respectées lors du procédé de réalisation pour garantir un bon fonctionnement du circuit.

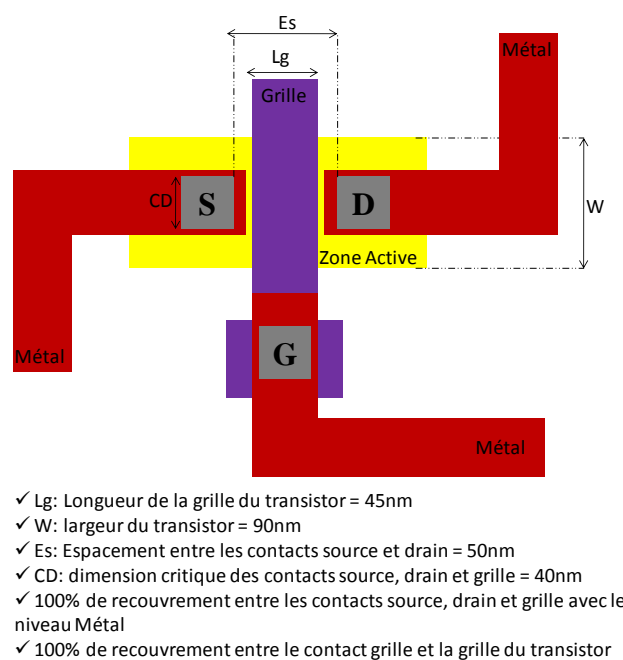


Figure 1. 3 Description de quelques règles de dessin dans un circuit de type CMOS pour le nœud 45nm (8)

L'évolution des circuits intégrés implique la réduction des dimensions caractéristiques de chaque niveau, dans le but d'améliorer à la fois la densité d'intégration et la rapidité des circuits. Par exemple, la réduction de la longueur de la grille des transistors (distance à parcourir par les porteurs de charges pour « traverser » un transistor) permet l'augmentation du courant dans le transistor et la diminution de la valeur des capacités parasites (18). Ces deux phénomènes réduisent le temps de basculement des transistors et permettent d'augmenter considérablement la vitesse de traitement de l'information dans le circuit.

### 1.3. Les étapes de fabrication d'un circuit intégré

Les circuits intégrés sont fabriqués sur des disques de silicium monocristallin appelés « plaquettes » (ou *wafer* en anglais). La taille de ces plaquettes a progressivement augmenté en passant d'un diamètre de 50mm en 1970 à un diamètre de 300mm de nos jours (19) (voir Figure 1.4). Certains industriels tel que *Samsung*, *TSMC* ou encore *Intel* parlaient de la création d'usines capables de produire des plaquettes de 450mm en 2010 (20). Cependant, l'énormes coût de l'adaptation des machines et de toute l'infrastructure pour les plaquettes 450mm a retardé son arrivé pour probablement 2015 (21).

De plus, la crise économique connue en 2009 n'a guère favorisé l'apparition des plaquettes 450mm dans les temps voulus.

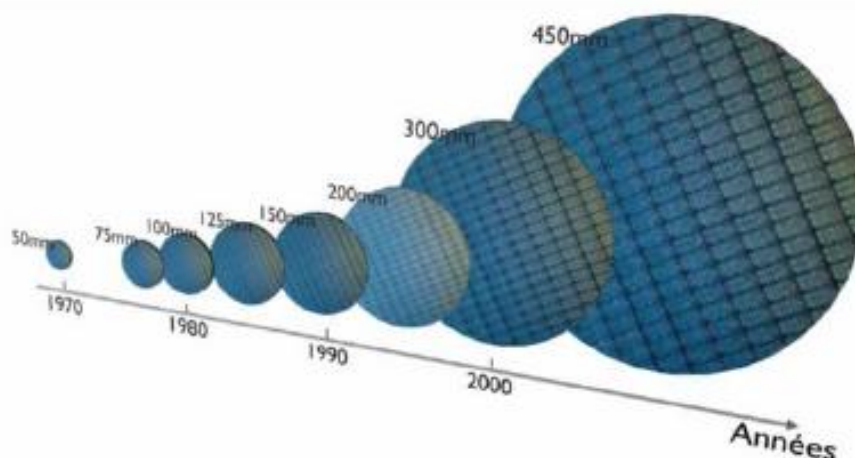


Figure 1. 4 Evolution de la taille des plaques de silicium

Cette augmentation de la dimension des plaquettes a permis l'augmentation du nombre de puces réalisées par plaquette. Cela a permis d'augmenter la productivité tout en réduisant le coût par puce. Avant qu'un circuit intégré ne soit fonctionnel et mis sur le marché, celui-ci passe par plus de 400 étapes technologiques. Ces étapes peuvent être classées en neuf grandes familles:

- L'épitaxie consiste à faire croître un matériau sur un autre matériau.
- Le dopage consiste à introduire des éléments chimiques dans un matériau.
- Le traitement thermique consiste à élever la température d'un substrat sous atmosphère contrôlée afin de changer ses propriétés.
- Le dépôt qui consiste à déposer un matériau sur un autre matériau.
- La lithographie optique (photolithographie) permet de définir les motifs de chaque niveau dans un film de résine.
- La gravure consiste à enlever la résine et transférer les motifs dans le substrat.
- Le polissage mécano-chimique permet d'aplanir une surface.
- Les nettoyages permettent d'enlever d'éventuels résidus à la surface d'un matériau.
- Les tests électriques permettant la vérification du bon fonctionnement du circuit final.

Toutefois, certaines de ces étapes ne s'appliquent qu'à certains niveaux (par exemple : le dopage s'applique à la réalisation des contacts sources et drains ainsi qu'au niveau actif), d'autres n'apparaissent que ponctuellement (par exemple : les tests électriques à la fin de la conception du circuit intégré).

Les travaux de cette thèse ont été réalisés dans le cadre de la lithographie optique. Dans la prochaine section, nous présenterons le principe de la lithographie, ses limitations ainsi que les techniques permettant de repousser ses limites de résolution.



## 1.4. Les bases de la lithographie optique

### 1.4.1 Principe de la lithographie optique

La lithographie optique (22) est l'étape qui permet de définir dans un film de résine, déposé sur un substrat, les motifs d'un niveau du circuit intégré dessinés préalablement sur un masque. La lithographie optique est généralement suivie d'une étape de gravure permettant de transférer dans le substrat les motifs définis dans le film de résine. Les avantages de la lithographie optique à l'échelle industrielle sont :

- Un débit de plaquettes très élevé (environ 125 plaquettes/heure) (23).
- Une grande reproductibilité.
- Une bonne précision dans la réalisation des motifs.

Généralement, un système de lithographie optique est composé de quatre éléments distincts montrés sur la Figure 1.5 : le système d'illumination, le masque, le système optique de projection et la résine déposée sur le substrat (la plaquette). Un film de résine photosensible est déposé préalablement sur la surface du substrat. La lumière émise par le système d'illumination est diffractée à la traversée du masque sur lequel sont dessinés les motifs du circuit à réaliser. Le système optique de projection permet de récolter les ordres de diffraction pour reconstituer l'image du masque.

L'intensité lumineuse formée par les ordres de diffraction à la sortie du système optique (au niveau de la plaquette) est appelée image aérienne. Cette dernière est reproduite avec un facteur de réduction défini par le système optique de projection.

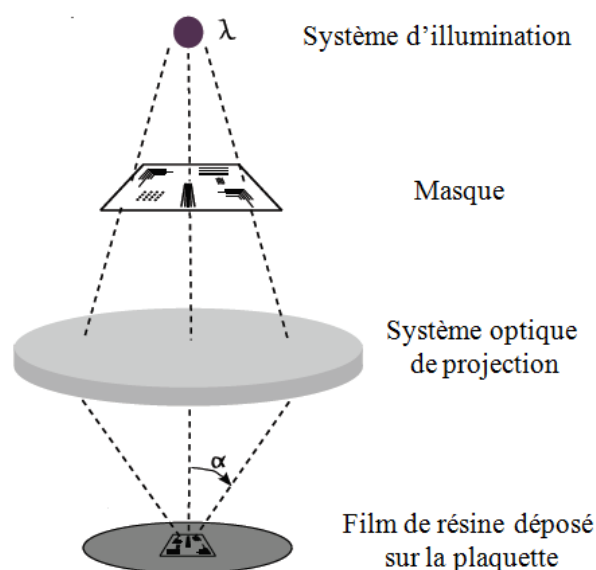


Figure 1. 5 Illustration schématique d'un système de lithographie optique par projection

### 1.4.1.1 Système d'illumination

Le système d'illumination est constitué d'une source monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$  et d'un condenseur. Aujourd'hui, on utilise des lasers excimères à base d'un mélange argon-fluor (ArF) pour obtenir une longueur d'onde d'exposition de 193 nm. Le condenseur est constitué d'un ensemble de lentilles, miroirs, et d'autres éléments optiques dont le rôle est de collecter et de filtrer la lumière provenant de la source. Dans un système lithographique, l'illumination est de type Köhler comme il est montré en Figure 1.6. Dans ce cas, la source est disposée au plan focal objet du condenseur. Ainsi, chaque point source produit une onde plane sur le masque. Cette configuration permet d'obtenir une illumination uniforme sur tout le masque (voir Figure 1.6).

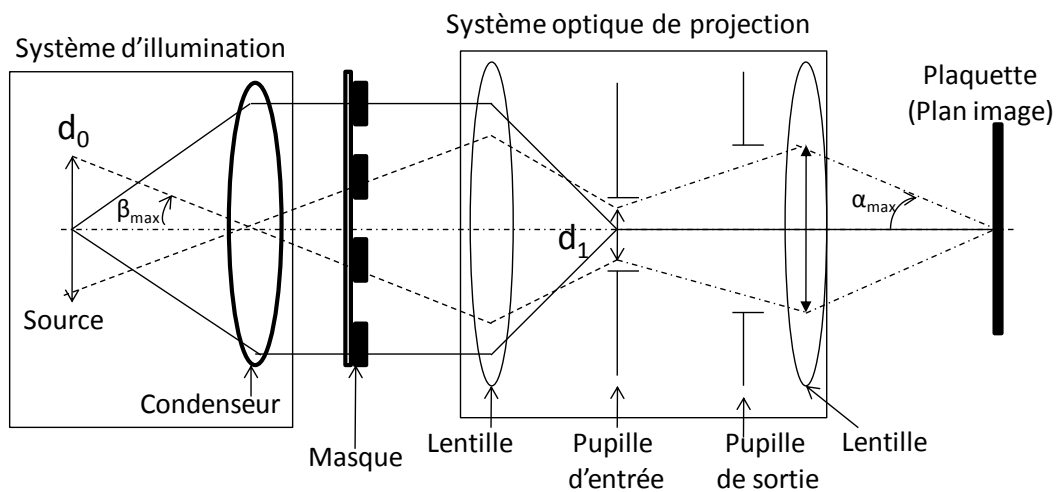


Figure 1. 6 Schéma d'un système d'illumination de Köhler

D'autre part, les lentilles du système optique de projection sont disposées de sorte que l'image de la source à travers l'optique d'illumination soit dans la pupille d'entrée du système optique de projection (voir Figure 1.6). Cependant, la taille ( $d_1$ ) de la source obtenue dans le plan de la pupille d'entrée est différente de la taille initiale ( $d_0$ ) de la source. Le rapport entre la taille de l'image de la source obtenue au niveau de la pupille d'entrée et l'ouverture numérique de la pupille d'entrée est appelé facteur de cohérence partielle  $\sigma$  de la source et il est donné par l'équation 1-1:

$$\sigma = \frac{\sin(\beta_{\max})}{NA_e} \quad 1-1$$

Où  $\beta_{\max}$  est le demi-angle maximal du cône de lumière incidente sur le masque comme schématisé sur la Figure 1.6.  $NA_e$  est l'ouverture numérique de la pupille d'entrée (pupille côté objet) du système optique de projection comme montré sur la Figure 1.6.

Les ouvertures numériques NA (de l'anglais *Numerical Apperture*) côté image et côté objet sont liées entre elles par un facteur de réduction définissant les lentilles du système optique de projection. Ainsi, la cohérence partielle de la source peut aussi s'exprimer en fonction de l'ouverture numérique côté image. Dans ce cas, la cohérence partielle de la source est donnée par l'équation 1-2.

$$\sigma = M \cdot \frac{\sin(\beta_{\max})}{NA_s} \quad \mathbf{1-2}$$

Où M est le facteur de réduction des lentilles du système optique de projection.

En d'autres termes, le facteur de cohérence partielle de la source se définit aussi comme étant le facteur de remplissage de la pupille du système optique. Il existe trois types de sources selon la valeur de  $\sigma$  :

- $\sigma = 0$ , la source est ponctuelle, on parle d'une source spatialement cohérente.
- $0 < \sigma < 1$ , la source est dite partiellement cohérente.
- $\sigma = 1$ , la source est dite incohérente.

Dans un système lithographique, les sources utilisées sont généralement des sources partiellement cohérentes.

#### 1.4.1.2 Le masque

Un masque classique, dit masque binaire, est composé de motifs en chrome (matériau opaque) déposés sur un substrat de verre de silice (matériau transparent). Les masques binaires transmettent la lumière dans les parties transparentes et absorbent totalement la lumière dans les parties opaques. Nous verrons par la suite que d'autres types de masques ont été inventés dans le but d'améliorer les performances lithographiques. Le masque est un élément critique du système lithographique. En effet, la qualité du circuit à imprimer dépend entre autre de la qualité du masque en termes de dimensions, de la planéité et de la précision des motifs dessinés sur le masque. De plus, le prix d'un masque est un paramètre à ne pas négliger dans le coût total du procédé lithographique.

Par exemple, l'impression du circuit d'une mémoire de type DRAM (de l'anglais *Dynamic Random Access Memory*) pour le nœud technologique 45nm nécessite l'utilisation de 26 masques (8). Sachant qu'aujourd'hui, un masque coûte dans les 30k\$ (24), cela revient à dépenser 780k\$ en budget masques seulement pour imprimer un circuit de mémoire DRAM pour le nœud 45nm, ce qui est loin d'être négligeable.

#### 1.4.1.3 Le système optique de projection

Le système optique de projection est composé de plusieurs lentilles fonctionnant en transmission. Le système optique permet de collecter la lumière diffractée par le masque et de la projeter sur plaquette avec un facteur de réduction (M) qui vaut actuellement 4 ou 5 selon les scanners. L'intérêt d'avoir un facteur de réduction supérieur à 1 est qu'il n'est plus nécessaire d'avoir les motifs du masque de la même taille que les motifs à imprimer. Cela relâche des contraintes sur la fabrication des masques. Etant donné que les ouvertures numériques côté objet et côté image sont liées entre elles par le facteur de réduction des lentilles du système optique de projection, les lithographes se sont entendus sur une convention. Cette convention permet d'exprimer les métriques lithographiques en fonction de l'ouverture numérique NA côté image.

L'ouverture numérique du système optique est un paramètre important qui conditionne la résolution de l'outil lithographique. Plus précisément, l'ouverture numérique décrit la capacité du système à collecter les ordres de diffraction issus du masque et qui participent à la formation de l'image au niveau de la plaquette (25). L'ouverture numérique NA est définie par l'équation 1-3.

$$NA = n \cdot \sin(\alpha_{\max}) \quad \mathbf{1-3}$$

Où  $n$  est l'indice du milieu défini entre la sortie du système optique et la plaquette et  $\alpha_{\max}$  est le demi-angle maximal du cône de lumière incident sur la plaquette comme schématisé sur la Figure 1.6.

#### 1.4.1.4 Les résines photosensibles

Chaque étape lithographique commence par l'étalement d'un film de résine sur la plaquette de silicium avant que celle-ci ne soit exposée dans le système lithographique. La résine est un matériau sensible à l'exposition lumineuse qui modifie sa composition chimique.

Les motifs du masque sont reproduits dans la résine sous forme d'une image latente. Le film de résine est ensuite plongé dans une solution de développeur, les parties insolées de la résine sont rendues solubles dans le cas d'une résine à tonalité positive. Pour une résine à tonalité négative, ce sont les parties non insolées qui sont rendues solubles. La Figure 1.7 illustre les deux types de résine positive et négative. Les propriétés de résolution des résines positives sont aujourd'hui meilleures que celles des résines négatives. C'est pour cette raison qu'aujourd'hui, les résines positives constituent la plus grande partie du marché. C'est à ce type de résine que l'on fera référence dans ce manuscrit. Les résines positives utilisées aujourd'hui en production sont des résines à amplification chimique (26). Ces dernières permettent de relâcher des acides qui diffusent durant l'étape de développement de la résine permettant ainsi d'accroître la sensibilité de la résine à l'exposition.

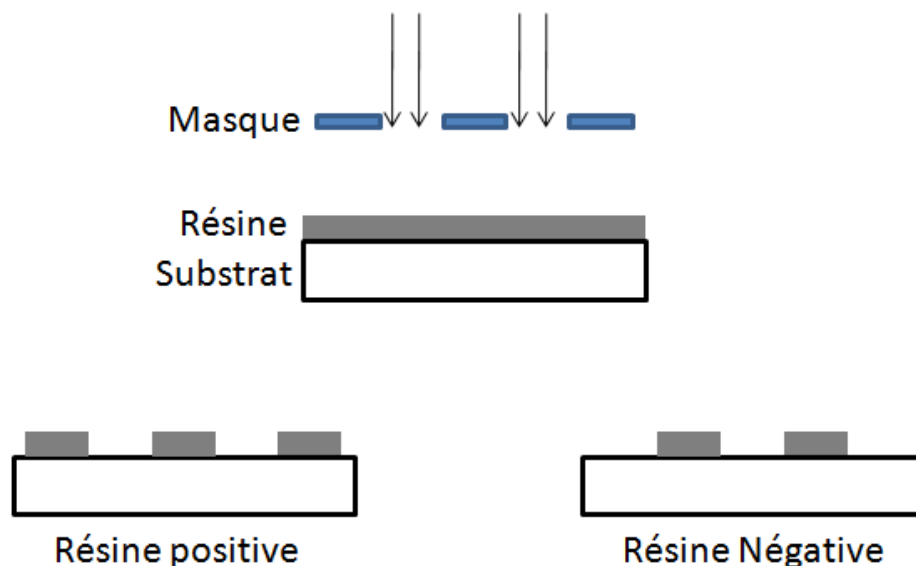


Figure 1. 7 Image dans la résine après développement dans le cas d'une résine positive et négative.

### 1.4.2 La formation de l'image aérienne

Le principe de formation de l'image aérienne (intensité lumineuse formée à la sortie du système optique) peut être décrit par la théorie de la diffraction. Dans le cas d'une source cohérente en incidence normale (voir la Figure 1.8.a); lorsque l'onde plane atteint des lignes parallèles de pas  $P$  dessinées sur le masque, la lumière est diffractée en  $m$  ordres se propageant dans les directions définies par les angles  $\alpha_m$  selon la loi de Bragg donnée par l'équation 1-4:

$$\sin(\alpha_m) = m \cdot \frac{\lambda}{P}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad 1-4$$

Où  $m$  est l'ordre de diffraction,  $\alpha_m$  l'angle de diffraction,  $\lambda$  la longueur d'onde et  $P$  le pas des motifs du réseau.

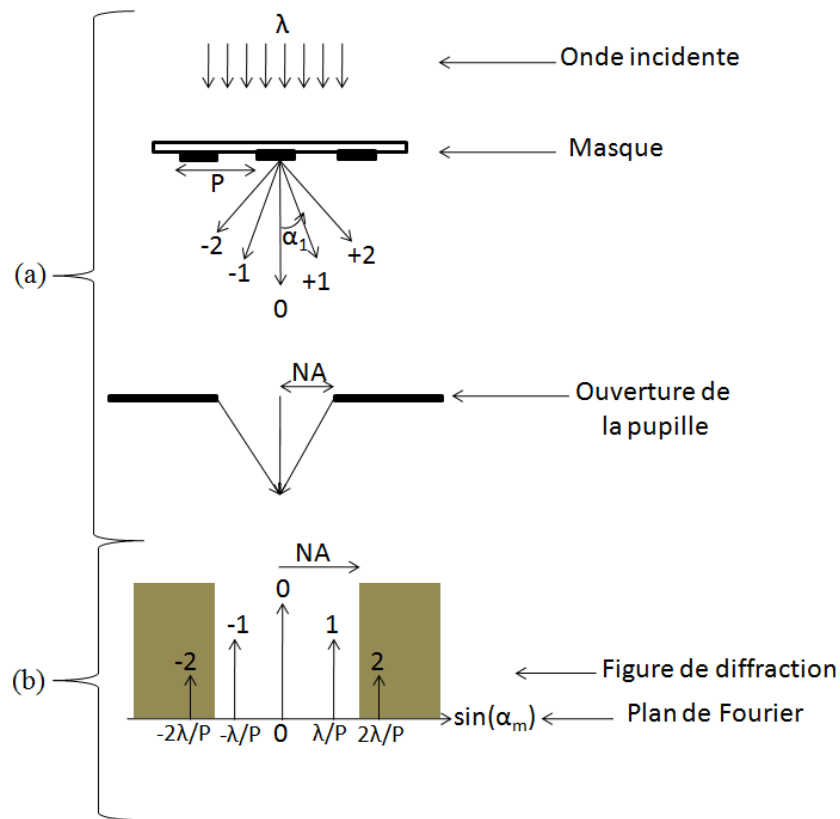


Figure 1. 8 Schéma du phénomène de diffraction ; a) distribution des ordres de diffraction d'un réseau périodique de période  $P$  sous une illumination cohérente ; b) Filtrage des ordres de diffraction par la pupille.

Chaque ordre de diffraction correspond à un pic de Dirac dans le plan de Fourier (plan des fréquences). D'après l'Équation 1- 4, la position des ordres de diffraction est fonction du pas du réseau. D'autre part, Rayleigh a montré que la capacité d'un système optique à résoudre un réseau de pas  $P$  est déterminée par sa capacité à capter les deux premiers ordres de diffraction  $0$  et  $\pm 1$  (27).

Par conséquent, dans le cas où les premiers ordres de diffraction sont captés par la pupille du système optique, ceux-ci vont interférer en formant ainsi l'image du masque au niveau de la plaquette. L'image formée n'est pas identique à ce qui a été dessiné sur le masque car les faisceaux diffractés de fréquences spatiales  $\sin(\alpha_m)$  supérieures à l'ouverture numérique  $NA$  ne sont pas captés par la pupille (voir Figure 1.8.b). Ainsi, la pupille se comporte comme un filtre passe-bas en captant seulement les premiers ordres de diffraction.

Lorsque le masque est éclairé sous une incidence oblique définie par un angle  $\beta$  comme montré en Figure 1.9, les ordres de diffraction dans le plan de Fourier seront décalés et donnés ainsi par l'équation 1-5.

$$\sin(\alpha_m) = \sin(\beta) + m \cdot \frac{\lambda}{P}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad 1-5$$

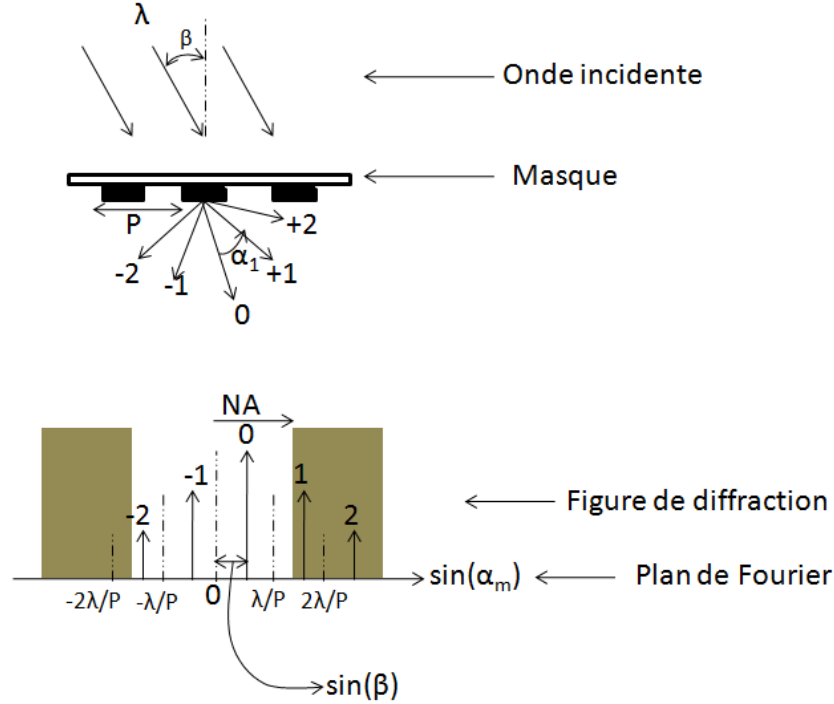


Figure 1. 9 Figure de diffraction d'un réseau périodique de période P éclairé sous incidence oblique.

Dans le cas d'une source partiellement cohérente, par exemple une source conventionnelle de facteur de cohérence  $\sigma$ , on peut considérer que les rayons lumineux proviennent de plusieurs point sources ayant des angles d'incidence différents  $\{\beta_i\}$ . Dans ce cas, la figure de diffraction est constituée d'une somme de peignes de Dirac distribués de part et d'autre des pics obtenus sous incidence normale. Ainsi, la Figure de diffraction montrée en Figure 1.10 est constituée de blocs de largeur L donnée par l'équation 1-6 :

$$L = 2 \cdot \sin(\beta_{\max}) = 2 \cdot \sigma \cdot NA \quad 1-6$$

Avec  $\beta_{\max}$  l'angle d'incidence maximal au niveau du masque, c'est-à-dire provenant d'un point situé à la périphérie de la source.

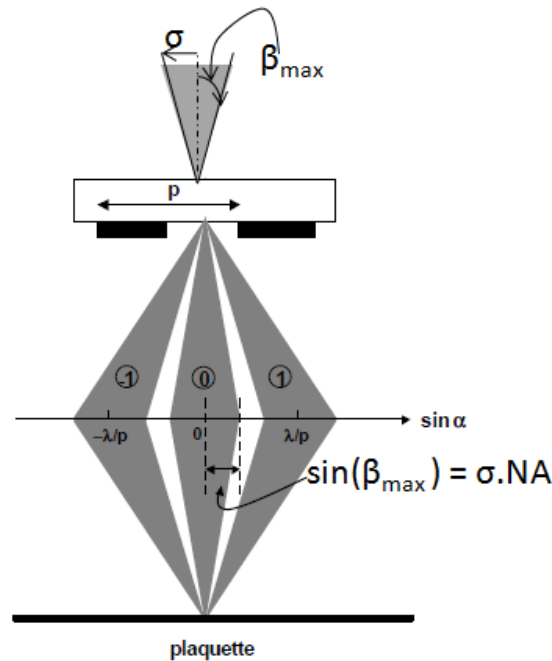


Figure 1. 10 Représentation schématique de la figure de diffraction d'un réseau périodique de lignes de pas  $P$  sous une illumination conventionnelle de facteur de cohérence  $\sigma$

La capture des premiers ordres de diffraction dans la pupille permet de former l'image du masque au niveau de la plaquette par un processus d'interférence. Deux faisceaux interfèrent s'ils sont issus d'un même point source. Chaque point collecté par la pupille interagit avec son homologue de l'ordre 0 (de la source) issu du même point source. On peut ainsi obtenir une interaction entre deux ordres (entre les ordres  $-1/0$  ou  $+1/0$ ), trois ordres (entre les ordres  $-1/0/+1$ ) ou plus selon le pas du réseau.

La Figure 1.11 schématise le cas des interférences à deux ordres entre les premiers ordres de diffraction pour un réseau de lignes de pas  $P$  illuminé avec une source conventionnelle de cohérence partielle  $\sigma$ . Les noeuds des premiers ordres de diffraction ( $-1$  et  $+1$ ) sont à  $-\lambda/P$  et  $+\lambda/P$  respectivement.

Chaque point de la surface de l'ordre  $+1$  ( $-1$ ) entourée d'une couleur rouge (bleue), qui est capté par la pupille, participe à la formation d'image par le processus d'interférences à deux ordres avec son homologue de la surface de l'ordre 0 colorée en rouge (bleue). La surface de l'ordre 0 qui ne participe pas à la formation d'image est colorée en vert clair.



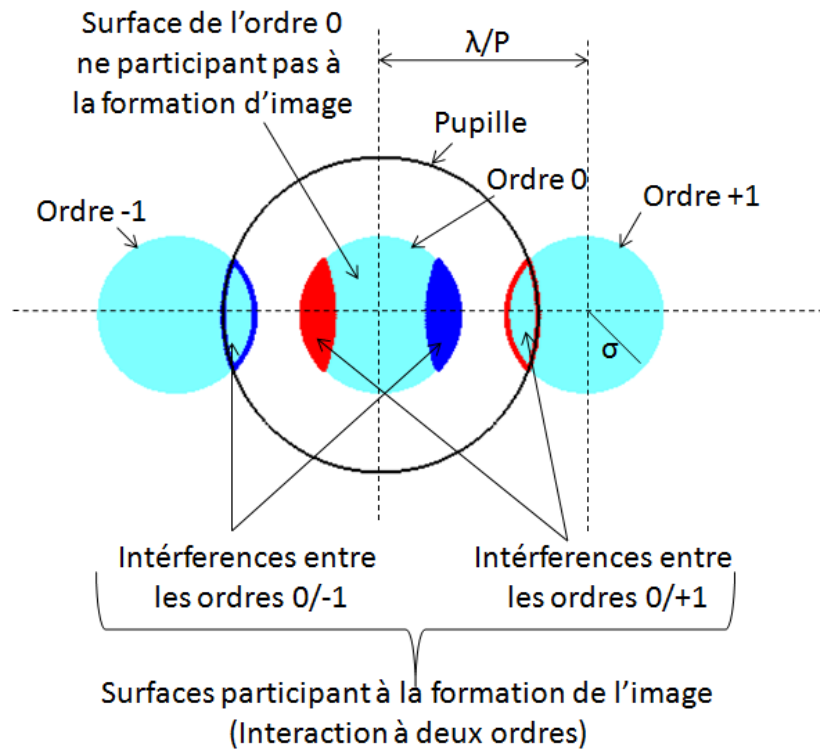


Figure 1. 11 Illustration des ordres de diffraction captés par la pupille, en utilisant un réseau de lignes de pas  $P$  et une source conventionnelle de cohérence partielle  $\sigma$ .

### 1.4.3 Les performances lithographiques

La qualité d'un procédé lithographique peut être caractérisée par sa résolution, le contraste de l'image aérienne formée, sa fenêtre de procédé ou encore le facteur d'erreur du masque. Les sections suivantes sont consacrées à la description de ces caractéristiques.

#### 1.4.3.1 La résolution

Un système lithographique est caractérisé par sa résolution limite. Celle-ci correspond au plus petit pas de réseau pouvant être résolu dans un film de résine. Le pas minimal pour lequel l'image aérienne est formée correspond au pas minimal permettant la capture des deux premiers ordres de diffraction. Théoriquement, la résolution définit le pouvoir séparateur d'un système optique qui détermine s'il est possible de distinguer deux taches de diffraction issues de deux points proches angulairement. Une tache de diffraction obtenue par une pupille circulaire se présente, comme il est montré en Figure 1.12.a, par un disque (dit disque d'Airy) entouré d'anneaux concentriques (28). La distribution d'intensité correspondant à une tache de diffraction est donnée par l'équation 1-7.

$$I(x) = I_0 \left[ 2 \cdot \frac{J_1(x)}{x} \right]^2 \quad 1-7$$

Avec,  $x$  est une position donnée sur le plan de la formation d'image,  $J_1$  est la fonction de Bessel d'ordre 1 et  $I_0$  est l'intensité maximale. Le profil d'intensité d'une tache de diffraction est montré en Figure 1.12.b, le rayon angulaire de la tache centrale est noté  $r$ .

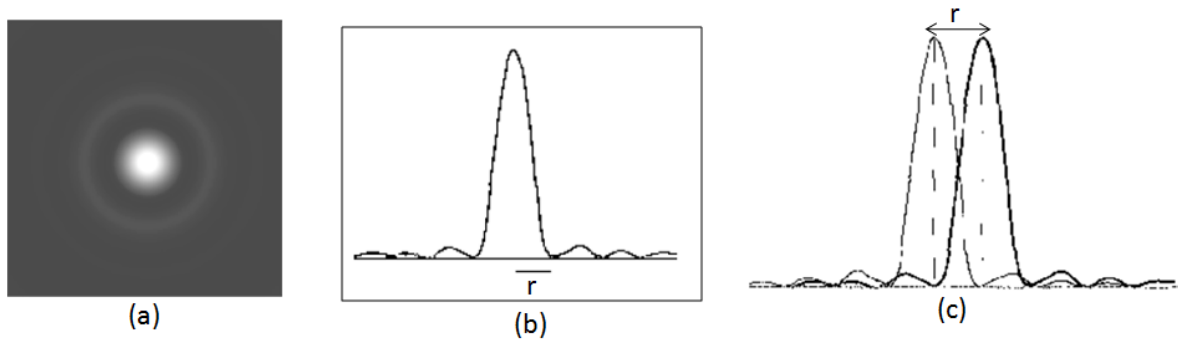


Figure 1. 12 (a) Tache de diffraction obtenue par une pupille circulaire, b) profil d'intensité d'une tache de diffraction par une pupille circulaire, c) profils d'intensité de deux taches de diffraction discernables entre elles

Deux taches de diffraction sont discernables si l'espacement entre les maxima des deux profils d'intensité, noté  $r$  sur la Figure 1.12.c, est supérieur ou égal à la distance entre le maximum central d'un profil d'intensité et le premier minimum de l'autre profil d'intensité (voir Figure 1.12.c). Dans ce cas, les maxima des deux profils d'intensité sont séparés d'une distance égale au rayon angulaire de la tache centrale de diffraction. Il a été montré que le rayon angulaire ( $r$ ) permettant de distinguer deux taches proches l'une de l'autre, dans un milieu d'indice  $n=1$  (air) est égal à 1.22 (29). Ainsi, la résolution théorique d'un système de diffraction optique à ouverture circulaire est donnée par le critère de Rayleigh décrit par l'équation 1-8.

$$\text{Pas}_{\min\_théorique} = 1.22 \frac{\lambda}{NA} \quad \mathbf{1-8}$$

Où  $NA$  représente l'ouverture numérique et  $\lambda$  la longueur d'onde.

Notons qu'il est possible de trouver dans la littérature, l'expression de la résolution théorique donnée en termes de dimension critique (CD) et décrite par l'équation 1-9.

$$\text{CD}_{\min\_théorique} = 0.61 \frac{\lambda}{NA} \quad \mathbf{1-9}$$

Afin de tenir compte des différents paramètres d'un procédé lithographique, les lithographes ont introduit un paramètre  $k_1$  pour déterminer le pas minimal pouvant être résolu par le système lithographique. Le plus petit pas pouvant être résolu lors d'un procédé lithographique est donné par l'équation 1-10.

$$\text{Pas}_{\text{min\_litho}} = k_1 \cdot \frac{\lambda}{\text{NA}} \quad \mathbf{1-10}$$

Où  $k_1$  est appelé le facteur de procédé prenant en compte la cohérence de la source, la résine, le type de masque, etc.

Le facteur de procédé  $k_1$  détermine la difficulté de réalisation du procédé lithographique, plus  $k_1$  est faible et plus le procédé lithographique sera complexe. Le facteur  $k_1$  a été progressivement réduit au cours des générations technologiques afin d'imprimer des pas de motifs de plus en plus petits. Nous verrons dans la section 1.5.3 les différentes techniques utilisées en microélectronique permettant de diminuer le facteur de procédé  $k_1$ .

D'autre part, en s'appuyant sur l'équation 1-10, nous avons reporté sur la Figure 1.13 la variation du facteur de procédé  $k_1$  en fonction de différentes valeurs de pas. Les valeurs reportées sur la Figure 1.13 ont été obtenues pour différentes valeurs d'ouverture numérique (0.8, 0.93 et 1.35) et une longueur d'onde de 193nm. Nous avons aussi reporté sur la Figure 1.13 la limite théorique du facteur de procédé  $k_1$  qui est de 0.5 (30). Le type de graphe montré en Figure 1.13 peut être lu de deux manières différentes.

La première façon consiste à dire que pour une valeur de  $k_1$  fixée se trouvant au-dessus de la limite théorique, la résolution des pas de plus en plus petits se fait en augmentant l'ouverture numérique de la pupille pour une longueur d'onde donnée. Par exemple, pour une valeur de  $k_1$  égale à 0.6, le pas de 130nm peut être résolu avec une ouverture numérique de la pupille égale à 0.93 (voir Figure 1.13). Si l'on garde cette même valeur de  $k_1$ , le pas de 90nm peut être résolu en augmentant l'ouverture numérique de 0.93 à 1.35 (voir Figure 1.13). Nous verrons dans la section 1.5.2 que l'augmentation de l'ouverture numérique permet d'améliorer la résolution lithographique.

La deuxième manière de lire le graphe montré en Figure 1.13 consiste à définir un pas de motifs à imprimer et de voir quel est le facteur de procédé qui lui correspond, c'est souvent ce genre de raisonnement qui est fait en pratique.

Par exemple, l'impression d'un pas de motifs égal à 90nm en utilisant une ouverture numérique égale à 0.8 ou 0.93 implique dans chaque cas un facteur de procédé inférieur à la limite théorique. Dans ces cas, le procédé lithographique est complexe rendant l'impression du pas de 90nm difficile à contrôler. Toutefois, en considérant une ouverture numérique plus grande que les précédentes, égale par exemple à 1.35 (voir Figure 1.13), l'impression du pas de 90nm implique un facteur de procédé plus grand que la limite théorique. Dans ce cas, le procédé lithographique permettant l'impression du pas de 90nm est plus facile à contrôler. Avec les outils de lithographie optique actuels accédant à une ouverture numérique de 1.35, l'impression des pas de motifs inférieurs à 64nm impliquent des facteurs de procédés inférieurs à la limite théorique (voir Figure 1.13) ce qui rend le procédé lithographique encore plus compliqué à contrôler. Dans ce cas, l'une des solutions proposées pour relâcher la contrainte sur le facteur  $k_1$  est d'utiliser la lithographie optique par double impression dont le principe sera introduit dans la section 1.6.2.

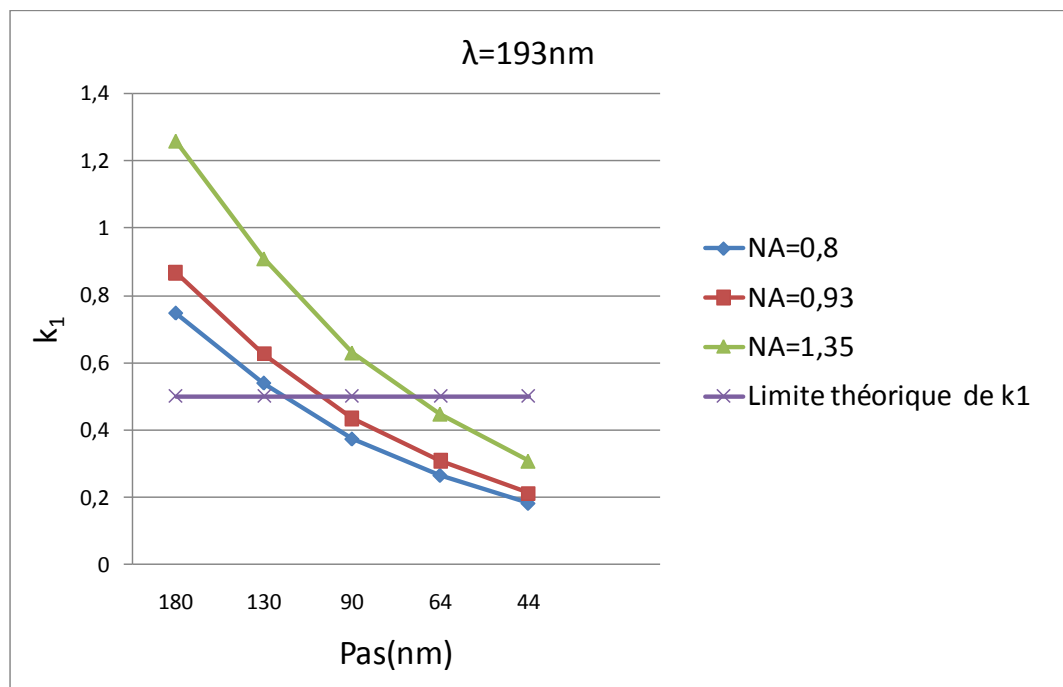


Figure 1. 13 Réduction du facteur de procédé  $k_1$  en fonction du pas des motifs à imprimer

### 1.4.3.2 Le contraste ou le logarithme de la pente de l'image aérienne ?

En lithographie, il est fréquent de caractériser la qualité de l'image aérienne par son contraste. Celui-ci se calcule selon l'équation 1-11.

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \cdot 100\% \quad \text{1- 11}$$

Où  $I_{\max}$  et  $I_{\min}$  sont respectivement l'intensité lumineuse maximale et minimale de l'image aérienne.

Plus il y a d'interférences constructives entre les ordres de diffraction, plus l'écart entre  $I_{\min}$  et  $I_{\max}$  est grand résultant ainsi en un meilleur contraste de l'image aérienne (voir Figure 1.14.a).

Lorsque le réseau étudié n'est pas périodique, il est plus judicieux de caractériser la qualité de l'image aérienne par une autre métrique, c'est le logarithme de la pente de l'image aérienne (voir Figure 1.14.b) appelé ILS (de l'anglais *Image Log Slope*).

Le calcul du ILS se fait selon l'équation 1-12.

$$ILS = \frac{1}{I_{\max}} \cdot \left. \frac{dI}{dx} \right|_{seuil} = \left. \frac{\partial \ln I}{\partial x} \right|_{seuil} \quad \text{1- 12}$$

Avec,  $I$  l'intensité lumineuse de l'image aérienne,  $I_{\max}$  l'intensité lumineuse maximale de l'image aérienne,  $\ln$  symbolise le logarithme népérien et le seuil est déterminé en fonction de la dimension critique du motif.

Plus l'ILS est grand et plus le motif sera mieux défini dans le film de la résine. Il est possible de trouver dans la littérature la variable NILS (de l'anglais *Normalized Image Log Slope*) qui n'est autre que la dimension critique (CD) du motif que multiplie l'ILS comme il est donné par l'équation 1-13.

$$NILS = CD \cdot ILS \quad \text{1- 13}$$

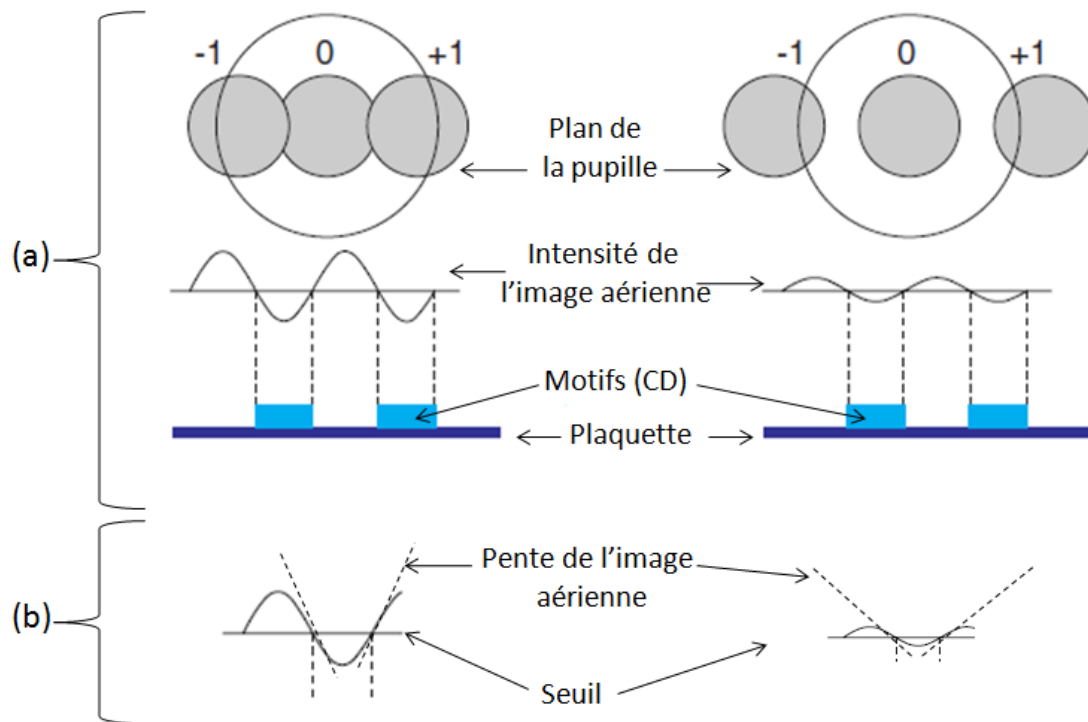


Figure 1. 14 a) plus d'interférences constructives entre les ordres de diffraction implique un meilleur contraste de l'image aérienne, b) plus le contraste est grand plus la pente de l'image aérienne est grande aussi.

#### 1.4.3.3 Fenêtre de procédé

Les erreurs de focalisation sur la plaquette (defocus) ont comme origine les erreurs de positionnement de la plaquette dans le scanner, les fluctuations du plan focal image du scanner, la variation de l'épaisseur de la résine sur la plaquette ou encore la topographie du substrat. Les erreurs de focalisation diminuent le contraste de l'image aérienne et donc dégradent la qualité d'impression des motifs dans la résine.

La profondeur de champ (DOF de l'anglais *Depth Of Focus*) correspond à la plage des focus pour laquelle les CD des motifs obtenus dans la résine restent dans la plage des spécifications (29). La profondeur de champ est un critère de tolérance en focus, elle est définie en théorie par l'équation 1-14.

$$\text{DOF} = k_2 \cdot \frac{\lambda}{\text{NA}^2} \quad \mathbf{1-14}$$

Où  $k_2$  est un facteur de procédé différent de  $k_1$ ,  $\lambda$  la longueur d'onde d'exposition et NA l'ouverture numérique de la pupille.

La latitude en énergie (EL de l'anglais *Exposure Latitude*) ou la latitude d'exposition est un critère de tolérance en dose d'exposition. Pour un bon fonctionnement d'un procédé lithographique, il est aussi nécessaire d'assurer un contrôle en dose pour supporter une éventuelle dérive du procédé. Ces dérives peuvent être causées par les fluctuations de la source et de la transmission du masque induisant une lumière parasite ou encore une exposition non uniforme sur toute la plaquette. La latitude en énergie correspond à la variation tolérée en termes de dose d'exposition pour laquelle les CD des motifs imprimés dans la résine restent dans la plage des spécifications définies.

On caractérise la qualité d'un procédé lithographique par sa fenêtre de procédé, c'est une grandeur qui indique les plages de variation possibles en focus et en dose pour lesquelles les motifs s'impriment dans la limite des spécifications. Ces dernières sont fixées par les lithographes en tenant compte des performances du scanner (NA,  $\lambda$ ), du nœud technologique, du budget de planéité des masques et du type de résine utilisée. Par exemple, pour l'impression des circuits intégrés du nœud technologique 28nm par lithographie 193nm en immersion, on parle d'une fenêtre de procédé définie par une profondeur de champ de 80nm à 5% de latitude en énergie. Ces spécifications sont définies en termes de valeurs des dimensions critiques des motifs imprimés dans la résine et sont en général fixés à  $\pm 10\%$  des CD obtenus aux conditions nominales.

En pratique, l'analyse de l'impression des motifs par rapport à la fenêtre de procédé se déduit à partir des courbes de Bossung (voir Figure 1.15). Les courbes de Bossung représentent la variation de la dimension critique d'un motif donné en fonction de la dose et du focus. De telles courbes permettent de déterminer la sensibilité des structures aux variations du procédé et de connaître sa fenêtre en observant l'allure des courbes. Si celles-ci sont très incurvées alors le motif sera très sensible à la position du plan focal et si elles sont très espacées, alors le motif sera très sensible aux variations de dose. En général, à partir de l'analyse des courbes de Bossung, on déduit des informations sur la latitude en énergie et la profondeur de champ désignant les variations en dose et en focus respectivement, pour que les CD des motifs imprimés restent en général à  $\pm 10\%$  du CD obtenu pour la condition nominale.

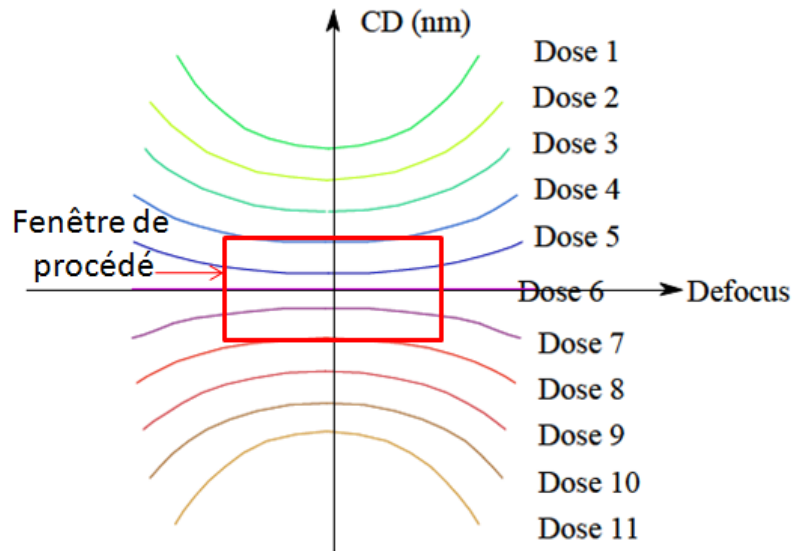


Figure 1. 15 Allure des courbes de Bossung

#### 1.4.3.4 Le facteur d'erreur du masque

Un autre paramètre devenu de plus en plus important en lithographie à cause du contrôle de la dimension critique des motifs de plus en plus exigeant est le facteur d'erreur du masque ou MEEF (de l'anglais *Mask Enhancement Error Factor*). Le MEEF est utilisé pour évaluer la sensibilité à des erreurs du CD au niveau masque (31). Il évalue l'impact d'une légère variation de la dimension d'un motif dessiné sur le masque sur la dimension du même motif reproduit au niveau de la plaquette. Le MEEF est défini par l'équation 1-15.

$$\text{MEEF} = M \cdot \frac{\Delta \text{CD masque}}{\Delta \text{CD plaquette}} \quad \mathbf{1-15}$$

Où M représente le facteur de réduction du système optique de projection.

Dans le cas d'un procédé linéaire, le MEEF est égal à 1, correspondant au cas d'une impression idéale. C'est-à-dire, les motifs du masque sont reproduits au niveau de la plaquette avec exactement les mêmes dimensions. Ceci reste un cas théorique car en pratique, le procédé lithographique n'est pas linéaire. En effet, dans un procédé lithographique, il faut tenir compte plusieurs paramètres comme la résine ou encore les effets de proximités optiques dus au fait de résoudre des motifs qui sont proches de la limite de résolution. C'est pourquoi le MEEF, en pratique, est généralement supérieur à 1.



## **1.5. Les techniques améliorant la résolution**

Nous avons vu dans la section 1.4.3.1 que la résolution est définie par le plus petit pas des motifs pouvant être résolu par un système lithographique. Elle est donnée par la formule de Rayleigh qui est exprimée par la relation  $R = k_1 \cdot \lambda / NA$ . La relation de Rayleigh peut être lue de deux manières différentes. La première manière consiste à dire : pour imprimer des pas de plus en plus petits, il faut diminuer la longueur d'onde et/ou augmenter l'ouverture numérique. Nous verrons dans les sections 1.5.1 et 1.5.2 respectivement comment la longueur d'onde a été diminuée et comment l'ouverture numérique a été augmentée pour atteindre des pas de plus en plus petits. La deuxième manière de lire la relation de Rayleigh consiste à dire : le système lithographique dont on dispose fixe la longueur d'onde et l'ouverture numérique et pour imprimer des pas de plus en plus petits, la seule solution qui reste à notre disposition est de diminuer le facteur de procédé. Nous verrons dans la section 1.5.3 quelles sont les techniques ayant permis de diminuer le facteur de procédé.

### **1.5.1 Diminution de la longueur d'onde**

Depuis plus de 30 ans, la réduction de la longueur d'onde de l'illumination a permis d'améliorer la résolution des systèmes lithographiques. Les premières sources en lithographie optique étaient la lampe à vapeur de mercure (Hg) ou encore un mélange de mercure – xénon (Hg - Xe) qui permettait d'obtenir des longueurs d'onde de 436 nm (raie G du spectre d'émission) ou de 365 nm (raie I). Le passage aux lasers excimères a permis de poursuivre cette diminution de la longueur d'onde. De nombreuses améliorations ont été apportées à ces lasers en particulier en termes de largeur de bande spectrale permettant leur introduction en production dans les systèmes lithographiques. Aujourd'hui, la longueur d'onde des lasers utilisés en production est de 193nm.

### **1.5.2 Augmentation de l'ouverture numérique**

L'amélioration de la résolution s'est également faite par l'augmentation de l'ouverture numérique des scanners. Ceci s'est réalisé au départ par le développement de lentilles de plus grande taille donc de plus grande ouverture numérique allant jusqu'à 0.8. Par la suite, l'introduction de la lithographie par immersion (32) a permis d'augmenter l'ouverture numérique de la pupille jusqu'à 1.35 tout en gardant l'infrastructure des outils d'exposition. L'immersion est aujourd'hui utilisée en production pour les nœuds technologiques avancés.

Le principe de l'immersion, montré en Figure 1.16, consiste à remplir l'espace entre la dernière lentille du système optique et la plaquette avec un fluide d'indice de réfraction supérieur à celui de l'air ( $n=1$  en milieu sec), actuellement de l'eau ( $n=1.44$  en immersion).

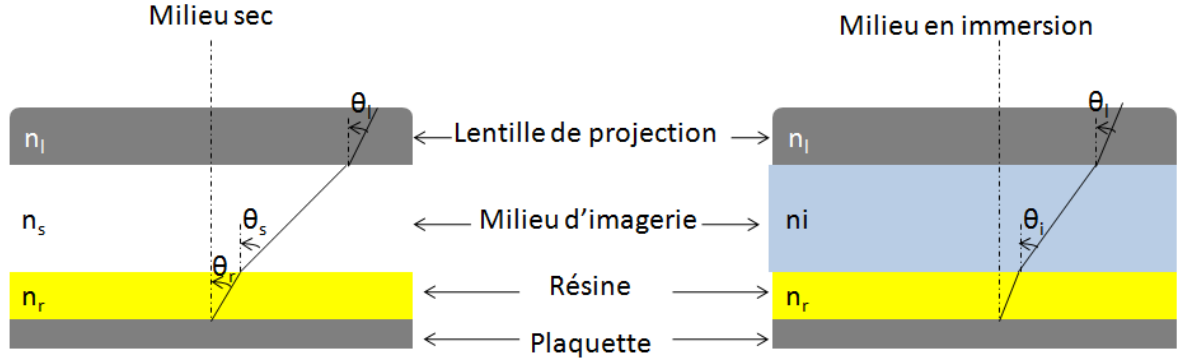


Figure 1. 16 Comparaison entre l'imagerie dans un système de lithographie sec et un système à immersion

L'angle maximal des rayons à l'interface milieu résine est diminué dans le cas de l'immersion comparé au cas d'un système sec :  $\theta_i < \theta_s$  (voir Figure 1.16). D'après l'équation 1-13 de la DOF, en gardant la même ouverture numérique de la lentille de sortie (donc les mêmes angles dans la résine) dans le cas sec et immersion, on obtient pour la DOF en immersion l'expression donnée par l'équation 1-16.

$$DOF_i = k_2 \cdot \frac{n_i \cdot \lambda}{(n_i \cdot \sin(\theta_i))^2} = k_2 \cdot \frac{n_i \cdot \lambda}{\sin(\theta_s)^2} \quad \mathbf{1-16}$$

D'où,

$$DOF_i = k_2 \cdot \frac{n_i \cdot \lambda}{NA^2} \quad \mathbf{1-17}$$

Ainsi,

$$DOF_i = n_i \cdot DOF_s \quad \mathbf{1-18}$$

La DOF en immersion est augmentée d'un facteur  $n_i$  (indice du milieu d'immersion). Ainsi, plus l'indice du fluide est grand, meilleure est la DOF. Plusieurs travaux ont permis de montrer l'augmentation de la DOF en immersion comparée à celle en milieu sec (33) (34).

D'autre part, l'immersion permet aussi d'améliorer la résolution car l'utilisation d'un liquide d'indice supérieur à celui des lentilles permet de diminuer l'angle maximal des rayons à l'interface résine milieu d'immersion et donc de capter les grands ordres de diffraction permettant ainsi d'améliorer la résolution ultime.

Cependant, l'immersion présente de nouveaux problèmes au niveau du procédé lithographique. Ces problèmes sont majoritairement liés au contact entre la résine et l'eau. La diffusion à l'interface eau-résine peut entraîner une modification locale de la concentration de la résine (35). De plus, il est possible que des bulles d'air soient créées dans l'eau modifiant ainsi le trajet des faisceaux optiques incident et perturbant ainsi la formation de l'image aérienne (36). Les contraintes liées à l'augmentation de l'ouverture numérique sont reportées sur la réalisation des masques qui deviennent de plus en plus complexes impliquant des corrections d'effets de proximité très poussées (37).

### 1.5.3 Diminution du facteur $k_1$

L'amélioration de la résolution peut également être réalisée par la diminution du facteur  $k_1$  dépendant du processus d'imagerie. Le facteur  $k_1$  peut être diminué en utilisant des résines plus résolvantes permettant d'imager des motifs de bonne qualité malgré la limite de diffraction. De plus, la modification de l'illumination, les corrections des effets de proximité optique et l'utilisation des masques à décalage de phase permettent de diminuer encore plus le facteur  $k_1$  et ainsi d'améliorer les performances lithographiques du procédé.

#### 1.5.3.1 Modification de l'illumination

L'illumination des outils lithographiques a évolué avec la réduction du paramètre de procédé  $k_1$ . Elle est passée de ce qu'on appelle, source conventionnelle aux sources hors axe comme par exemple un annulaire ou un quadripolaire montrés en Figure 1.17. L'intérêt des sources hors axe est qu'elles diminuent la surface de l'ordre 0 ne participant pas à la formation d'image, ce qui augmente le contraste de l'image formée.

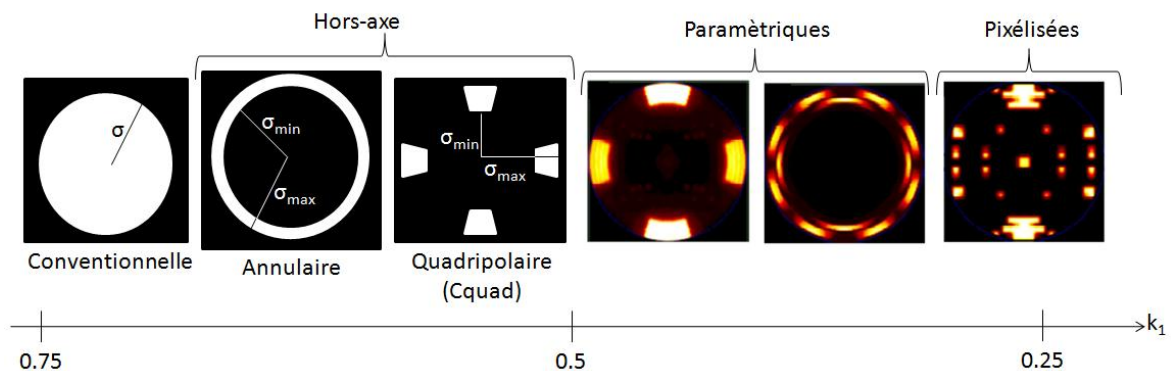


Figure 1. 17 Différents type d'illuminations utilisées en lithographie optique.

L'évolution des sources a continué vers le passage aux sources paramétriques (voir Figure 1.17) qui sont des combinaisons de différentes sources hors axes. Actuellement, on parle de l'utilisation de sources pixélisées dont un exemple est montré en Figure 1.17, pour la production des circuits intégrés des nœuds avancés (22nm et au-delà). Ces sources sont optimisées de manière heuristique pour l'impression des motifs les plus denses dans les circuits des nœuds technologiques futurs. On parle dans ce cas de co-optimisation entre les motifs à imprimer et la source ou encore SMO (de l'anglais *Source Mask Optimization*). Le choix du type de source à utiliser dépend essentiellement des géométries à imprimer (38) et des spécifications en termes de performances lithographiques (39). Lorsque les règles de dessin sont restreintes, notamment pour le nœud technologique 22nm, les illuminations hors axe rendent l'impression des motifs très délicate dans certaines orientations, on parle alors d'orientations critiques.

### 1.5.3.2 Corrections des effets de proximité optique

En pratique, plus on s'approche de la limite de diffraction, plus les effets de proximité augmentent. L'image formée au niveau de la plaquette présente des distorsions en fonction de la proximité des différents motifs. En effet, deux mêmes motifs placés dans deux environnements différents sur un masque (un environnement plus dense que l'autre) ne vont pas s'imprimer de la même manière (40). Pour corriger ces distorsions, on applique au masque des distorsions inverses basées sur le redimensionnement des motifs à imprimer, c'est l'OPC de l'anglais (*Optical Proximity Correction*). Par exemple, les bouts de lignes ont tendance à se rétracter lors de l'impression, l'OPC procède à une extension du bout de ligne permettant ainsi une impression fidèle au motif visé (voir Figure 1.18). De la même manière les lignes se rétrécissent lors de l'impression, alors l'OPC augmente la taille de la ligne sur le masque permettant ainsi une impression conforme à celle visée (voir Figure 1.18).

Le redimensionnement des motifs pas OPC utilise des modèles calibrés à partir de données expérimentales qui simulent le procédé lithographique (41) (42). Au cours des corrections OPC, les bords des motifs sont fragmentés et ajustés en fonction des résultats de simulation du procédé lithographique. La Figure 1.19 montre la première itération d'une correction OPC basée sur un modèle de procédé lithographique. Le trait gris représente le motif visé (de l'anglais *target*) sectionné en différents fragments. De plus, le trait rouge représente le contour de simulation de l'impression dans la résine.

Enfin, le trait vert représente l'erreur de placement d'un bord (de l'anglais *Edge Placement Error*) qui donne l'erreur entre le contour simulé et le motif visé. L'objectif étant de réduire l'erreur de placement EPE des bords des motifs en ajustant la position des fragments. Les corrections OPC sont assez complexes et peuvent nécessiter un temps de calcul non négligeable. En général, les corrections OPC se font en plusieurs itérations comprenant à chaque fois un redimensionnement des motifs à imprimer au niveau du masque suivi d'une simulation de l'impression des motifs puis une comparaison du résultat de simulation obtenu avec celui souhaité. Au fur et à mesure des itérations, le masque change pour que les contours d'impression simulés se rapprochent des contours visés et que l'erreur EPE soit minimisée au maximum.

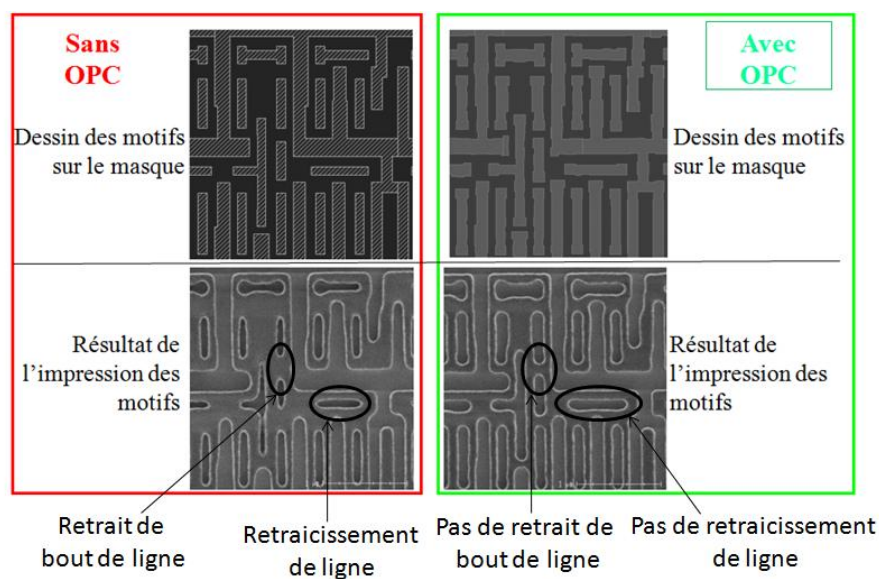


Figure 1. 18 Photos de simulation comparant l'impression de motifs ayant ou non subi des corrections OPC.

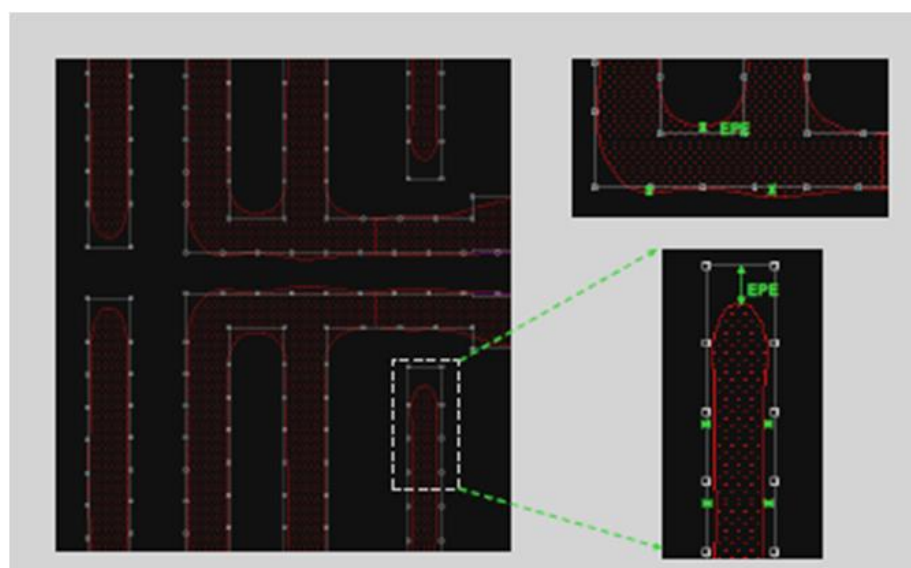


Figure 1. 19 Erreur de placement d'un bord (EPE) entre le contour simulé (rouge) et le contour visé (gris)

### 1.5.3.3 Les masques à décalage de phase

Dans le but d'améliorer la résolution, de nouveaux masques ont été inventés pour remplacer les masques binaires classiques. Il s'agit des masques à décalage de phase dit PSM (de l'anglais *Phase Shift Mask*) (43). Un masque PSM utilise le même substrat qu'un masque binaire sauf qu'un déphaseur est rajouté aux niveaux des motifs. Le principe du décalage de phase a été introduit pour la première fois en microélectronique par Levenson en 1982 (44). En plus d'intervenir sur l'intensité lumineuse, les masques PSM modulent la phase dans le but de réaliser une interférence à deux ondes (entre les premiers ordres de diffraction) améliorant la résolution et la profondeur de champ par rapport aux masques binaires (45). Il existe plusieurs types de masques PSM, on peut citer les PSM atténués (de l'anglais *Attenuated PSM*), les PSM alternés (de l'anglais *Alternated PSM*) et les PSM sans chrome (de l'anglais *Chromeless PSM*). Dans les PSM atténués (46), le matériau chrome (matériau opaque) est remplacé par un matériau légèrement transparent (de l'ordre de 6% à 30%) introduisant un déphasage de  $180^\circ$  modulant la phase. Dans ce cas, l'amplitude de la lumière transmise par le masque est positive d'un côté et négative de l'autre côté comme le montre la Figure 1.20. Cette opposition garantit un passage par la valeur zéro impliquant ainsi une amplitude de l'intensité de l'image aérienne, par extension le contraste, plus importante en utilisant un masque PSM atténué qu'en utilisant un masque binaire. La Figure 1.20 schématise un exemple de gain en contraste avec un masque PSM atténué comparé au masque binaire.

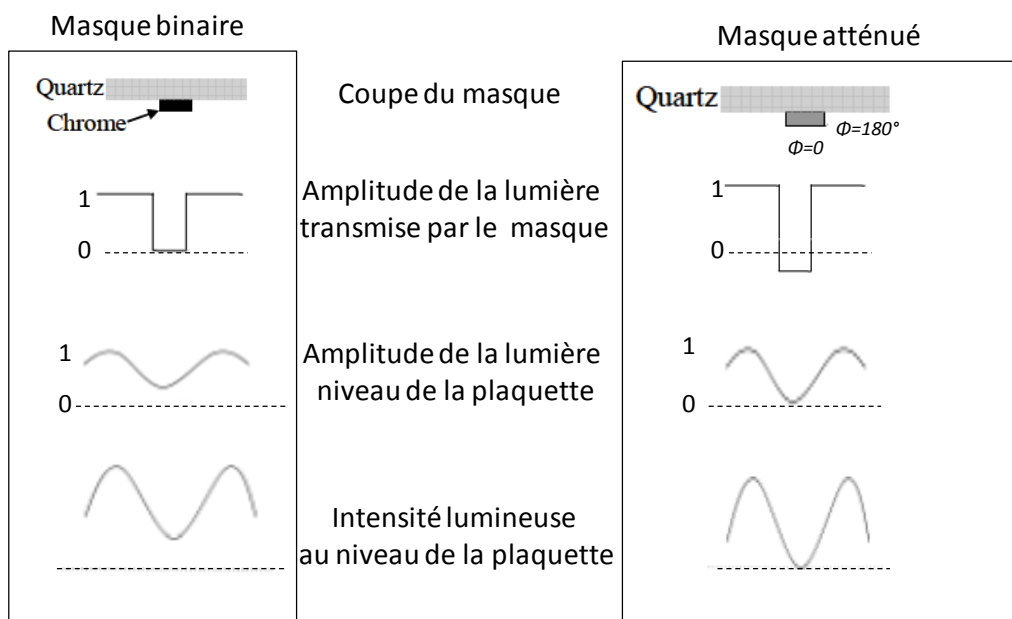


Figure 1. 20 Comparaison schématique entre le masque a) binaire et b) PSM atténué. Transmission, amplitude et intensité pour un motif élémentaire.

Dans les masques PSM alternés (47), le déphasage se trouve de part et d'autre du motif. Dans les masques PSM sans chrome (48) le déphasage est similaire à celui des masques PSM alternés sauf qu'il n'y pas de chrome. Aujourd'hui, les masques les plus utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs sont les masques PSM atténués. Les masques PSM alternés ainsi que les masques sans chrome ne sont pas utilisés et leurs recherches ont été abandonnées depuis quelques années (49).

## **1.6 Quelle technique d'impression pour les circuits avancés (22nm et au-delà) ?**

L'ITRS prévoit une limite à la miniaturisation dans les années 2020-2030 avec une longueur de grille de transistor atteignant 5nm (50). Jusqu'aujourd'hui, la réduction de la taille des transistors a été réalisée par la lithographie optique accompagnée d'avancées technologiques pour améliorer la résolution. Cependant, cette technique atteint ses limites en termes de résolution (51). Il existe des techniques lithographiques permettant la réalisation de motifs dessinés en dessous de la résolution lithographique : la nano impression (52), la lithographie électronique (53) ou encore la lithographie sans masque (54). Cependant, toutes ces techniques ne peuvent pas encore être utilisées en production car aucune d'entre elles ne répond aux exigences industrielles en termes de rendement. Pour rester dans la course à la miniaturisation des circuits intégrés, il devient primordial de trouver une nouvelle technique d'impression permettant de produire les exigences dimensionnelles des futurs circuits. La technique future la plus prometteuse pour imprimer des circuits du nœud technologique 22nm et au-delà est la lithographie extrême ultraviolet. Cependant, celle-ci n'est pas encore prête pour la production industrielle et en attendant qu'elle le soit, la lithographie par double impression (de l'anglais *Double Patterning Technique*) se présente comme la seule alternative permettant de rester dans la course à la miniaturisation.

### **1.6.1 La lithographie extrême ultraviolet**

La lithographie extrême ultraviolet (EUV) (55) permet d'imprimer des circuits dessinés en dessous de la limite de résolution des outils de lithographie optique actuels. En effet, elle se situe dans la continuité des développements technologiques permettant de diminuer la résolution des systèmes de lithographie en réduisant la longueur d'onde d'exposition.

La longueur d'onde utilisée en lithographie EUV (13,5 nm) est absorbée par tous les matériaux et gaz. C'est pour cette raison que la lithographie EUV exige d'une part la réalisation de toutes les étapes lithographiques sous vide, et d'autre part, l'élaboration d'un système optique fonctionnant uniquement en réflexion (miroirs de Bragg) y compris le masque. Depuis les premières études, à la fin des années 1980, la lithographie EUV a fait l'objet de nombreux développements permettant de réaliser les premiers équipements prototypes en 2006 par la société ASML. Toute fois, il reste un certain nombre de points techniques à optimiser pour que son industrialisation soit décidée. En effet, la puissance et la stabilité de la source restent encore insuffisantes. De plus, de nouvelles résines doivent être développées pour contrôler la rugosité des bords des motifs.

Aujourd'hui, la lithographie EUV n'est pas assez mature pour une utilisation industrielle (56) à cause notamment de son faible débit, soit  $\sim 6$  plaquettes/heure alors qu'un débit de  $\sim 120$  plaquettes/heure est exigé par l'industrie de la microélectronique.

### **1.6.2 La lithographie par double impression**

La lithographie par double impression (57) se définit par l'ensemble d'étapes technologiques schématisées sur la Figure 1.21. La première étape de la double impression consiste à séparer les motifs d'un dessin donné et de les placer sur deux masques différents. Le but de cette décomposition, appelée aussi coloriage, est d'élargir les pas des motifs à exposer et de relâcher la densité des motifs sur chacun des deux masques d'exposition. Ainsi, chacun des deux masques peut être résolu lors de l'exposition. Il existe dans la littérature des travaux qui ont été réalisés sur la technique de double exposition (58). Toutefois, bien que la double exposition utilise deux masques d'exposition, celle-ci reste fondamentalement différente de la technique de double impression qui constitue le sujet de cette thèse. En double impression, les deux masques générés par la décomposition sont imprimés l'un à la suite de l'autre, sur la même plaquette de silicium permettant ainsi de reproduire les motifs du dessin original (voir Figure 1.21).



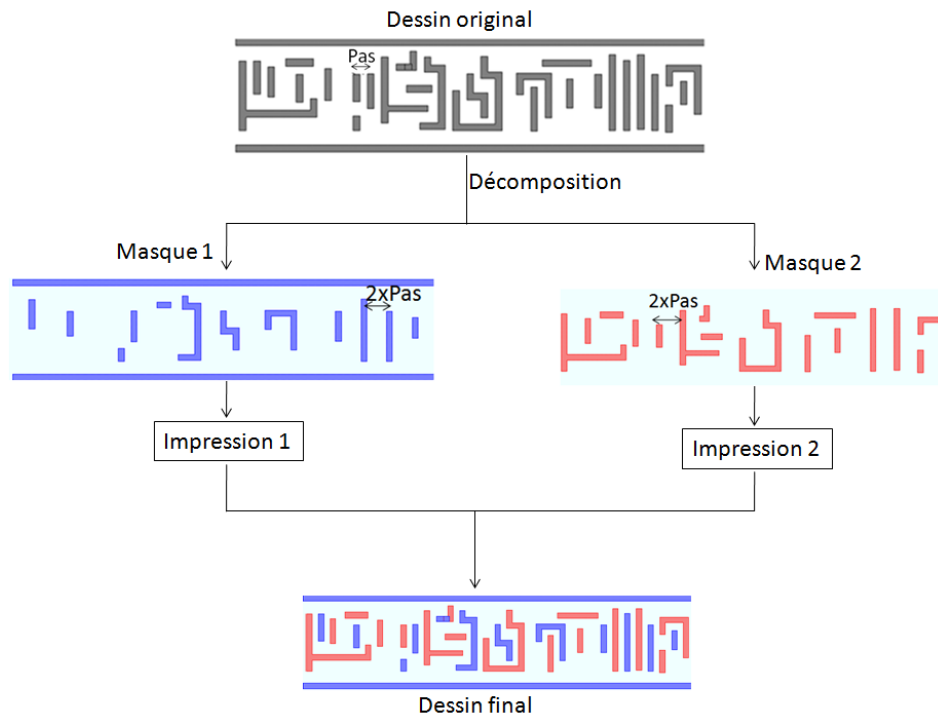


Figure 1. 21 Principe de la technique de double impression

Les niveaux définissant les futurs circuits (22nm et au-delà) se multiplient de plus en plus. En effet, plus la densité des circuits augmente, plus le nombre de niveaux pour connecter tous les composants actifs du circuit est important. Cela a un coût non négligeable sur la réalisation d'un circuit intégré notamment par la double impression. En effet, la technique de double impression utilise deux masques pour imprimer les motifs d'un niveau du circuit intégré ce qui multiplie le nombre de masques total utilisé pour la réalisation du circuit. Par conséquent, le prix final des masques utilisés pour l'impression d'un circuit est un facteur critique dans le budget de production par double impression. Cependant à l'heure actuelle, cela reste moins cher que le développement des machines EUV estimé à 125 million de dollar par machine (59). De plus, les étapes technologiques (lithographie, gravure, ...) pour imprimer les motifs d'un niveau du circuit sont doublées impliquant ainsi deux fois plus de paramètres à contrôler lors du procédé de double impression. Par ailleurs, l'alignement des deux masques utilisés pour l'impression des motifs d'un niveau reste un autre point critique de la technique qui doit être maîtrisé pour garantir une impression fidèle. D'autre part, la décomposition des motifs du dessin original reste un challenge majeur de cette technique. Où doit se faire la décomposition des motifs ? Sur quels critères faut-il se baser pour décomposer un dessin ? Nous répondrons à ces questions dans le chapitre suivant. Malgré tous les challenges de la double impression, cette technique reste privilégiée pour la production industrielle en attendant que la lithographie extrême ultraviolet soit prête.

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu que l'industrie de la microélectronique repose continuellement sur la réduction des dimensions des circuits intégrés à imprimer. En pratique, cette miniaturisation des circuits a toujours été réalisée par la lithographie optique. En effet, c'est l'étape qui définit la densité maximale des motifs imprimable sur une plaquette. A l'heure actuelle, la lithographie optique arrive à sa limite de résolution bien que d'énormes progrès ont été réalisés pour pousser cette résolution au maximum possible. Pour pouvoir rester dans la course à la miniaturisation, la seule technique permettant d'imprimer aujourd'hui des circuits intégrés avancés (22nm et en dessous) est la lithographie par double impression. Cette dernière nécessite l'utilisation de deux masques pour l'impression de chaque niveau du circuit intégré impliquant ainsi le contrôle de deux fois plus de paramètres lors du procédé de double impression. De plus, la décomposition des motifs d'un niveau donné du circuit intégré est un autre point critique de la technique de double impression. Dans le chapitre suivant, nous nous proposons de présenter en détails la lithographie par double impression.



## **Chapitre 2**

# **La lithographie par double impression**

## Sommaire

<b>Chapitre 2 La lithographie par double impression .....</b>	<b>51</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>53</b>
<b>2.1. Procédés lithographiques pour la double impression .....</b>	<b>53</b>
2.1.1 Impression par décomposition directe.....	54
2.1.1.1 Principe .....	54
2.1.1.2 Implication des règles de dessin.....	57
2.1.2 Impression par décomposition indirecte.....	58
2.1.2.1 Principe .....	58
2.1.2.2 Implication des règles de dessin.....	61
2.1.3 Comparaison des procédés .....	63
<b>2.2 Théorie de la décomposition pour la double impression .....</b>	<b>66</b>
2.2.1 Génération d'un graphe à partir d'un dessin de circuit.....	66
2.2.2 Décomposition d'un graphe.....	67
2.2.1 Les conflits de décomposition .....	70
2.2.1.1 Présentation du problème .....	70
2.2.1.2 Comment éviter les conflits de décomposition ?.....	72
<b>2.3. Décomposition du niveau contacts.....</b>	<b>77</b>
<b>2.4 Objectifs de la thèse .....</b>	<b>81</b>

# INTRODUCTION

La double impression est aujourd'hui la seule méthode lithographique permettant d'imprimer les circuits intégrés de nouvelle génération avec un coût acceptable et dans les limites de temps définies par l'ITRS. La double impression permet l'impression de motifs dessinés en-dessous de la limite de résolution lithographique, tout en conservant la longueur d'onde d'exposition de 193nm et sans changer l'infrastructure des unités de fabrication actuels. Néanmoins, de nombreuses problématiques doivent être maîtrisées pour amener cette technique à maturité pour une utilisation industrielle. Dans ce chapitre, nous aborderons les procédés lithographiques utilisés par la double impression ainsi que l'implication des règles de dessin sur chaque procédé. Ensuite, nous présenterons le principe des algorithmes de décomposition utilisés pour la double impression. Enfin, nous conclurons par les objectifs de cette thèse.

## 2.1. Procédés lithographiques pour la double impression

En utilisant les scanners à immersion actuels, l'impression de circuits dessinés en dessous de la résolution lithographique peut se faire de deux manières différentes, nous avons choisi d'appeler ces deux techniques :

- L'impression par décomposition directe du circuit original (de l'anglais *pitch splitting*).
- L'impression par décomposition indirecte du circuit original (de l'anglais *self aligned double patterning*).

Pour expliquer le principe de ces deux techniques, considérons la structure montrée en Figure 2.1. Les pas des lignes de cette structure sont tous inférieurs au pas minimum résolu par un système lithographique. Nous allons voir comment imprimer cette structure par décomposition directe et par décomposition indirecte dans les sections 2.1.1 et 2.1.2 respectivement.



Figure 2.1. Exemple de structure dessinée en dessous de la résolution lithographique

## 2.1.1 Impression par décomposition directe

### 2.1.1.1 Principe

La décomposition directe consiste à décomposer les motifs d'un circuit sur deux masques différents qui vont être exposés l'un à la suite de l'autre dans le but d'imprimer le circuit voulu. Cette décomposition au niveau du masque utilise des algorithmes dont le principe sera expliqué par la suite. Elle est dite directe car les motifs obtenus à chaque étape lithographique correspondent à ceux dessinés sur chaque masque. Il existe deux procédés différents utilisés pour l'impression d'un circuit par décomposition directe :

- Le procédé litho-gravure-litho-gravure ou encore LELE (de l'anglais *litho-etch-litho-etch*)
- Le procédé litho-litho-gravure ou encore LLE (de l'anglais *litho-litho-etch*)

Pour imprimer la structure montrée en Figure 2.1, le procédé lithographique LELE (60) utilise cinq étapes lithographiques que l'on peut voir sur la Figure 2.2.a :

- Une première exposition permet de définir les motifs dessinés sur le premier masque dans un film de résine.
- Les motifs définis lors de la première lithographie sont gravés dans le masque dur.
- La troisième étape consiste à aligner le deuxième masque par rapport au premier.
- La quatrième étape consiste à déposer une deuxième couche de résine sur toute la surface de la plaquette, recouvrant ainsi tous les motifs formés suite aux deux premières étapes lithographiques. Puis une seconde exposition permet de définir dans la résine les motifs dessinés sur le deuxième masque.
- La dernière étape est une étape de gravure qui transcrit tous les motifs formés dans le substrat.

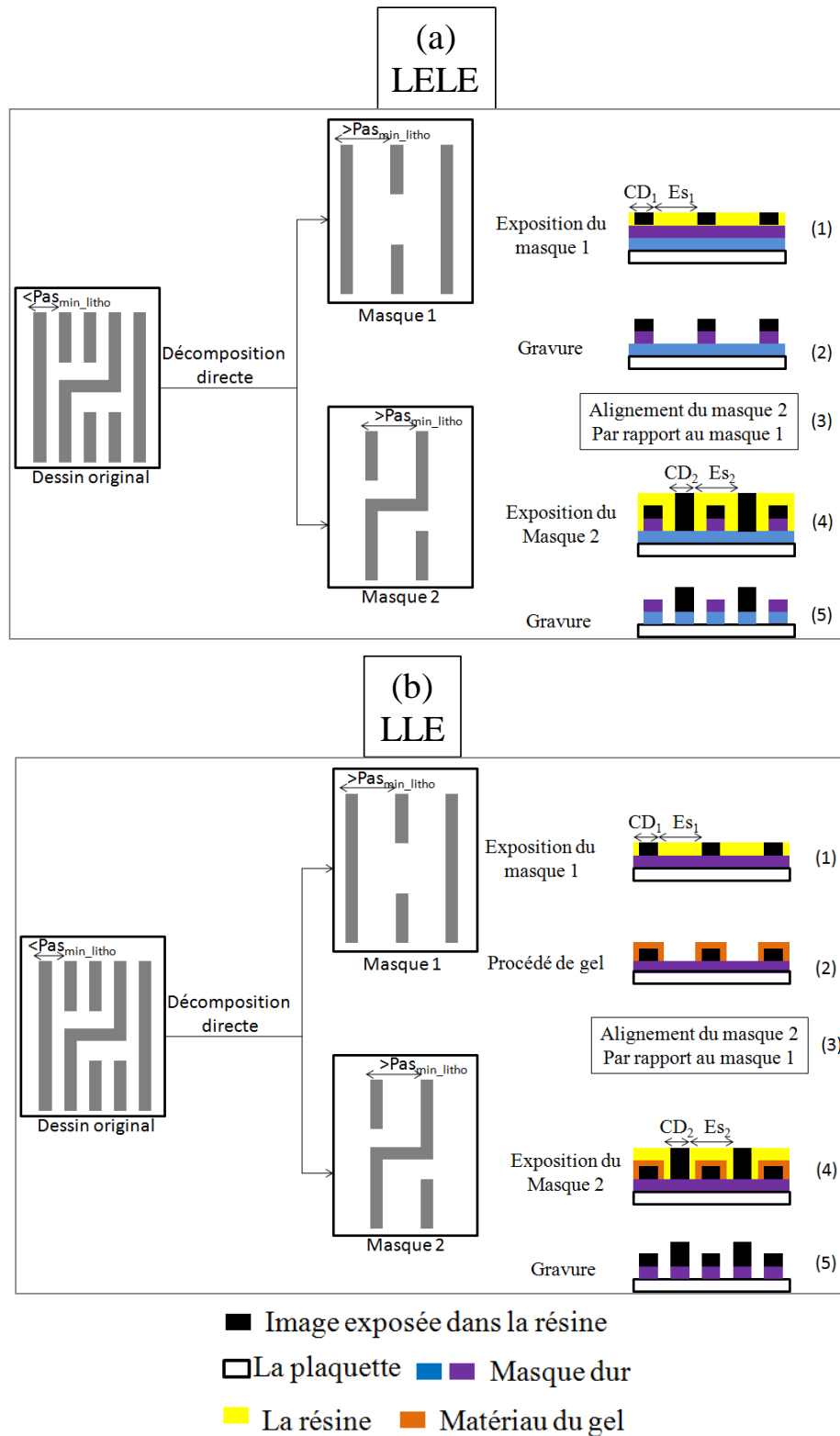


Figure 2.2. Illustration schématique des différentes étapes du procédé a) LELE, b) LLE

Le procédé LLE (61) est réalisé suite aux cinq étapes lithographiques montrées sur la Figure 2.2.b. Les motifs obtenus suite à la première exposition sont gelés lors de la deuxième étape par des procédés de gel chimique (62) ou de gel thermique (63).



Le but de cette étape est d'éviter que les motifs formés lors de la première exposition soient impactés par la deuxième exposition. Cette stratégie a été développée dans la perspective d'un procédé moins coûteux et moins long que le procédé LELE, nécessitant une seule étape de gravure. Cependant, la complexité de cette technique réside dans la chimie des matériaux utilisés (64).

Les deux procédés lithographiques dédiés à la double impression par décomposition directe, à savoir LELE et LLE, impliquent le contrôle de deux populations pour les lignes ( $CD_1$  et  $CD_2$ ) et de deux populations pour les espacements ( $Es_1$  et  $Es_2$ ) pour atteindre les budgets en uniformité de CD (CDU) recommandés (65). Le contrôle de ces dimensions critiques est sensible à l'alignement du deuxième masque par rapport au premier (de l'anglais *overlay*).

L'alignement du deuxième masque d'exposition par rapport au premier est un point critique des deux techniques de double impression LELE et LLE. En effet, un bon alignement des deux masques permet d'imprimer des périodes (des pas) de motifs fidèles aux périodes visées. En pratique, l'alignement est réalisé dans le scanner et il est vérifié à la fin du procédé de double impression en mesurant deux populations de pas voisins puis en les comparant aux pas visés (66). Lorsque l'alignement des deux masques a été bien maîtrisé lors du procédé de double impression (LELE ou LLE), les pas des motifs obtenus (voir Figure 2.3.b) sont conformes aux pas visés (voir Figure 2.3.a). Par contre lorsque, l'alignement des deux masques n'a pas été bien maîtrisé, les pas des motifs obtenus au final seront différents de ceux visés (voir Figure 2.3.c). Dans ce cas, on parle de phénomène de « pas marchant » (de l'anglais *pitch walking*) qui risque d'impacter le bon fonctionnement du circuit.

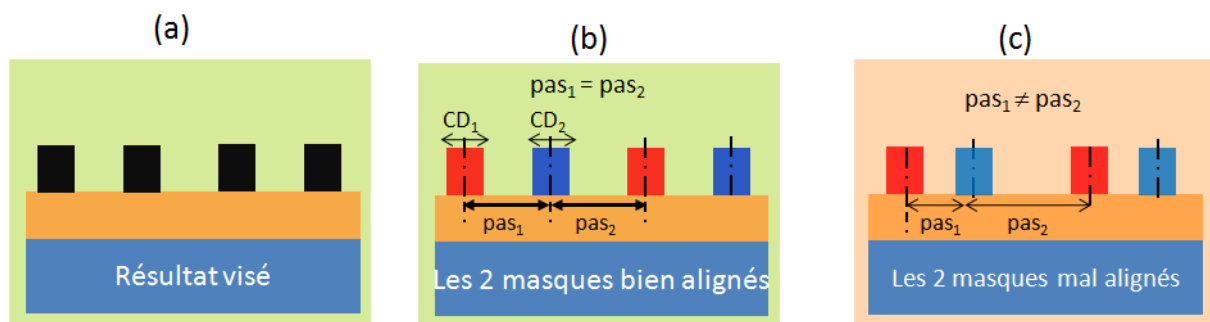


Figure 2.3. Illustration schématique de, a) structures visées ; résultat obtenu dans le cas des, b) deux masques bien alignés ; c) des deux masques mal-alignés

Prenons l'exemple d'un transistor dans lequel le contact grille est exposé sur un masque différent de celui des contacts source et drain (voir Figure 2.4.a). Si l'alignement entre les deux masques est mal contrôlé, le contact grille peut s'imprimer de telle sorte que son recouvrement avec son niveau (la grille) ne soit pas total (voir Figure 2.4.b).

On est alors en présence de phénomène de pas marchant entre les deux masques. Dans ce cas, le risque de non connexion du transistor est non nul, ce qui peut nuire au bon fonctionnement du transistor. En effet, la diminution de la surface de recouvrement du contact avec la grille entraîne une augmentation de la résistance du contact car ces deux grandeurs sont inversement proportionnelles (67).

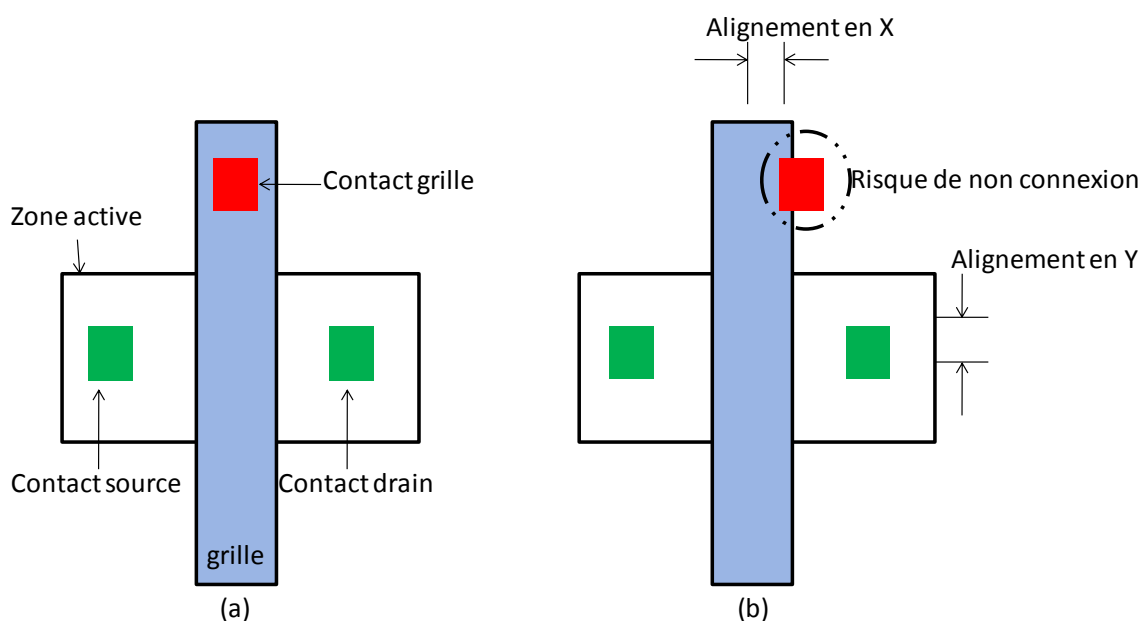


Figure 2.4 a) Schéma d'un transistor, les contacts source et drain sont imagés sur un même masque et le contact grille sur un autre masque, b) Alignement des deux masques mal contrôlé provoquant un dysfonctionnement du transistor

### 2.1.1.2 Implication des règles de dessin

Que ce soit avec la technique de décomposition directe LELE ou LLE, le motif final est obtenu par l'exposition successive de deux masques obtenus par décomposition directe des motifs originaux. Chacun des deux masques est défini par un ensemble de polygones et doit être résolu lors d'une exposition lithographique. Nous avons vu dans le chapitre 1 que la formation de l'image en lithographie optique dépend, entre autre, du pas des motifs dessinés sur le masque. Si les pas des motifs dessinés sur un masque sont supérieurs au pas minimal résolu lors d'un procédé lithographique, alors l'image du masque est formée au niveau de la plaquette. Si cette condition n'est pas vérifiée, alors il n'y a pas de formation de l'image.

Chaque motif dessiné sur un masque est défini par une dimension critique et un espacement. Ainsi, l'espacement entre les motifs sur les masques dédiés aux procédés LELE ou LLE peut être égal à n'importe quelle valeur supérieure ou égale à l'espacement minimal (voir Figure 2.5.a). Si l'espacement entre les motifs est inférieur à l'espacement minimal (voir Figure 2.5.b), alors ces deux motifs doivent être mis sur deux masques différents afin qu'ils puissent être résolus lors du procédé de double impression. Sur la Figure 2.5.b, les deux motifs sont de couleurs différentes représentant les deux masques différents.

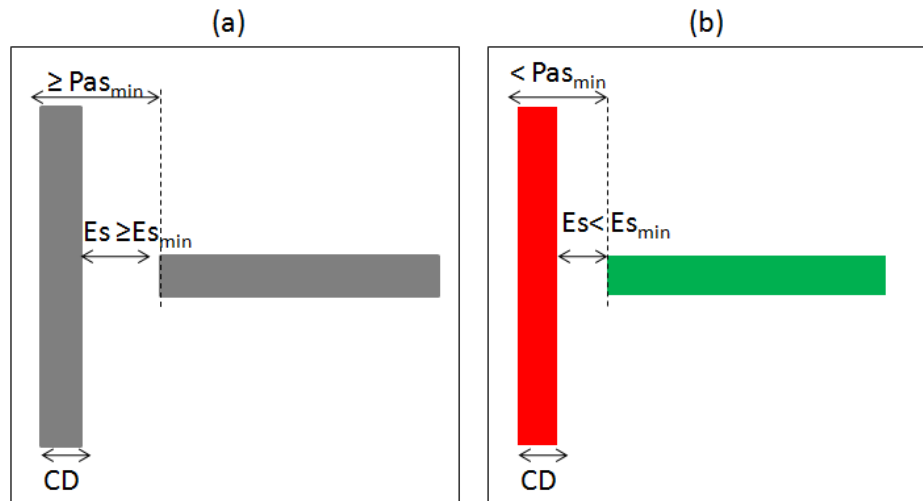


Figure 2.5. Exemple de structure décrivant les règles de dessin pour les masques utilisés en LELE ou LLE, a) structure pouvant être imprimée sur un même masque, b) structure devant être décomposée en deux masques.

## 2.1.2 Impression par décomposition indirecte

### 2.1.2.1 Principe

L'impression par décomposition indirecte est utilisée depuis le nœud technologique 45nm pour la réalisation du niveau grille (68) (69). La décomposition indirecte est beaucoup moins intuitive que la décomposition directe, vu dans la section 2.1.1, car le dessin original ne correspond pas forcément aux dessins dessinés sur les deux masques d'exposition. La décomposition indirecte de la structure étudiée dans cette partie est montrée en Figure 2.6. La génération des deux masques utilisés pour la décomposition indirecte est obtenue par des algorithmes de décomposition (70).

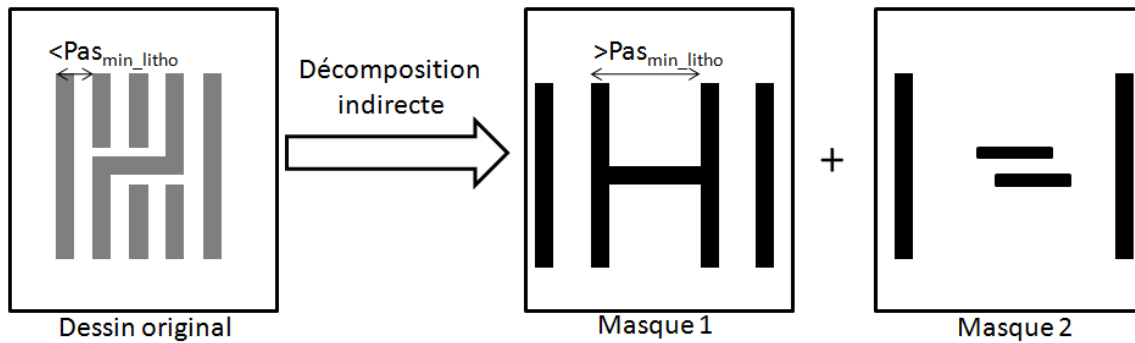


Figure 2.6. Exemple montrant la décomposition indirecte d'une structure dessinée en dessous de la résolution lithographique

Le principe de la décomposition indirecte implique essentiellement cinq étapes technologiques (71) montrées en Figure 2.7 :

- Une première lithographie est réalisée permettant d'imprimer les motifs dessinés sur le premier masque dans un film de résine (voir Figure 2.7.a). Les motifs formés lors de cette étape servent de support pour l'étape suivante.
- Un dépôt d'un matériau dit espaceur est réalisé sur les motifs formés lors de l'étape précédente (voir Figure 2.7.b). Le matériau espaceur utilisé peut être un oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) ou un nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).
- La troisième étape consiste à graver l'espaceur et à enlever la résine de manière à définir de nouveaux motifs de part et d'autre de chaque motif défini lors de la première étape (voir Figure 2.7.c). Les plots ainsi formés sont des plots d'espaceur dont le pas est deux fois plus important que celui des plots formés lors de la première lithographie. A ce niveau du procédé, le doublement de pas est réalisé.
- La quatrième étape consiste à aligner le deuxième masque par rapport au premier, puis à réaliser une deuxième exposition en utilisant le deuxième masque (voir Figure 2.7.d). Ce deuxième masque (appelé *mask cut* en l'anglais) sert à former des blocs de résine dans le but de définir des bouts de lignes et d'enlever les motifs formés lors du procédé et n'appartenant pas à la structure originale.
- La dernière étape du procédé consiste à transférer par gravure tous les motifs formés dans le masque dur (voir Figure 2.6.e).

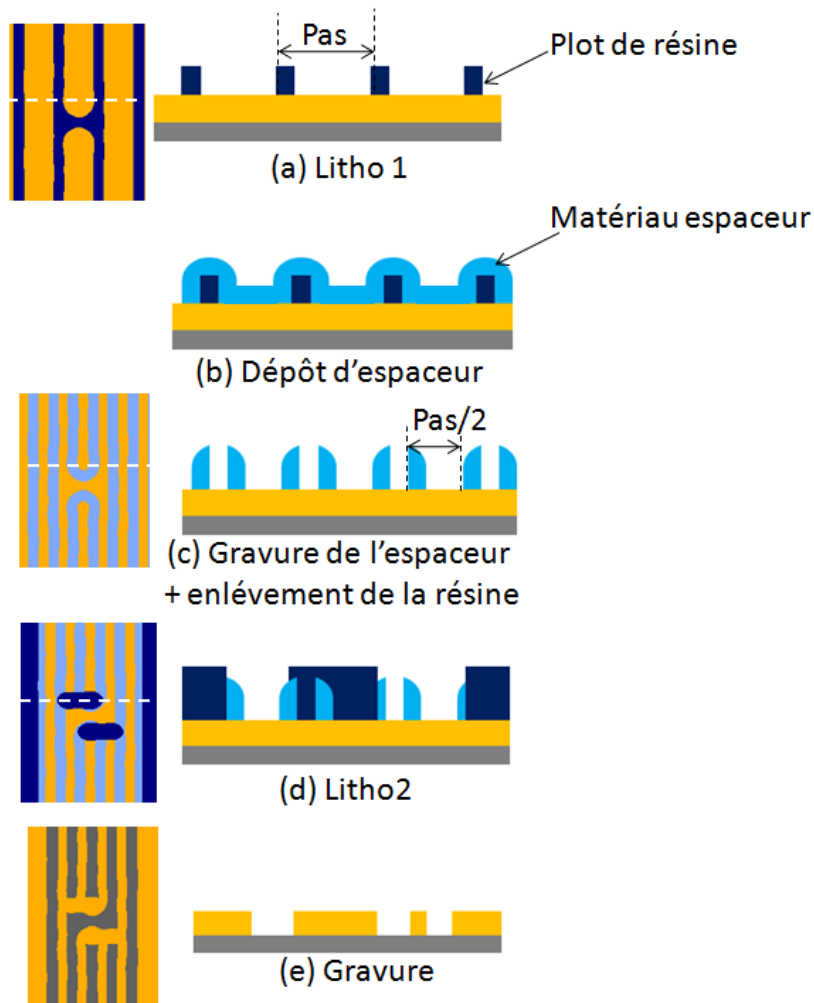


Figure 2.7. Représentation schématique des étapes d'impression par décomposition indirecte.

La technique d'impression par décomposition indirecte exige le contrôle de quatre populations de dimensions critiques : deux populations pour les lignes ( $CD_1$  et  $CD_2$ ) et deux populations pour les espacements entre les motifs ( $Es_1$  et  $Es_2$ ) dans le but d'atteindre les budgets CDU recommandés (72).

En utilisant la technique d'impression par décomposition indirecte, le CDU des lignes est contrôlée par la première lithographie et le dépôt de la couche d'espaceur. Par contre, le CDU des espacements dépend du dépôt de l'espaceur et du type de structure (1D ou 2D) imprimée (73). En effet, dans le cas de lignes parallèles (1D), l'uniformité des espacements est contrôlée par le dépôt de l'espaceur seulement. Tandis que dans le cas 2D, l'uniformité des espacements est contrôlée par le dépôt de l'espaceur ainsi que par l'alignement des deux masques.

Dans le cas où le CDU des espacements n'est pas bien contrôlé, on est en présence de phénomène de « pas marchant » (de l'anglais *pitch walking*) schématisé sur la Figure 2.8.

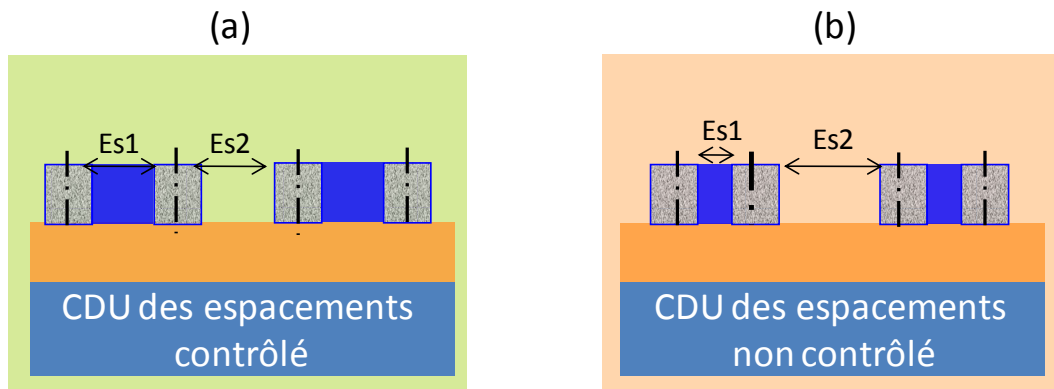


Figure 2.8. Illustration schématique de motifs générés par la technique d'impression par décomposition indirecte dans le cas, a) CDU des espacements contrôlé, b) CDU des espacements non contrôlé (phénomène du pas marchant)

### 2.1.2.2 Implication des règles de dessin

La technique d'impression par décomposition indirecte permet d'atteindre des espacements plus agressifs que ceux obtenus par décomposition directe. Considérons par exemple la structure dessinée en dessous de la résolution lithographique et présentée en Figure 2.9.a. Dans le cas où cette structure est imprimée par la technique de décomposition directe (voir Figure 2.9.b), les deux lignes sont imprimées sur deux masques différents. Ainsi, l'espacement (Es) entre les deux lignes est impacté par trois facteurs : la litho 1 (du masque 1), la litho 2 (du masque 2) et les erreurs d'alignement entre les deux masques. Cependant, dans le cas d'une impression par décomposition indirecte, cet espacement n'est impacté que par la litho 2. En effet, l'impression par décomposition indirecte de cette structure (voir Figure 2.9.c) consiste à faire une première lithographie en utilisant le premier masque sur lequel est dessiné un motif en forme de « T » (voir Figure 2.9.c « 1 »). A ce stade, le motif en forme de « T » réalisé représente des tranchées. Puis, le dépôt de l'espaceur autour de la forme en « T » (voir Figure 2.9.c « 2 »). Ensuite, la gravure de l'espaceur au niveau du motif formé lors de la première étape technologique ainsi que le retrait de résine permet de définir une partie du motif souhaité (voir Figure 2.9.c « 3 »). Sur la Figure 2.9.c « 3 », les lignes en couleur bleu représente l'espaceur. Enfin, une deuxième lithographie est réalisée en utilisant le masque 2 montré en Figure 2.9.c « 4 » et permettant ainsi de remplir certaines zones de résine afin de définir le motif visé. L'espacement (Es) visé entre les deux lignes est obtenu lors de la deuxième lithographie, il est défini par le polygone du masque 2 entouré sur la Figure 2.9.c « 4 ».

Par conséquent, l'espaceur ( $E_s$ ) visé est impacté par la deuxième lithographie seulement et peut ainsi atteindre des valeurs plus agressives (74) que celles obtenues lors de l'impression par décomposition directe.

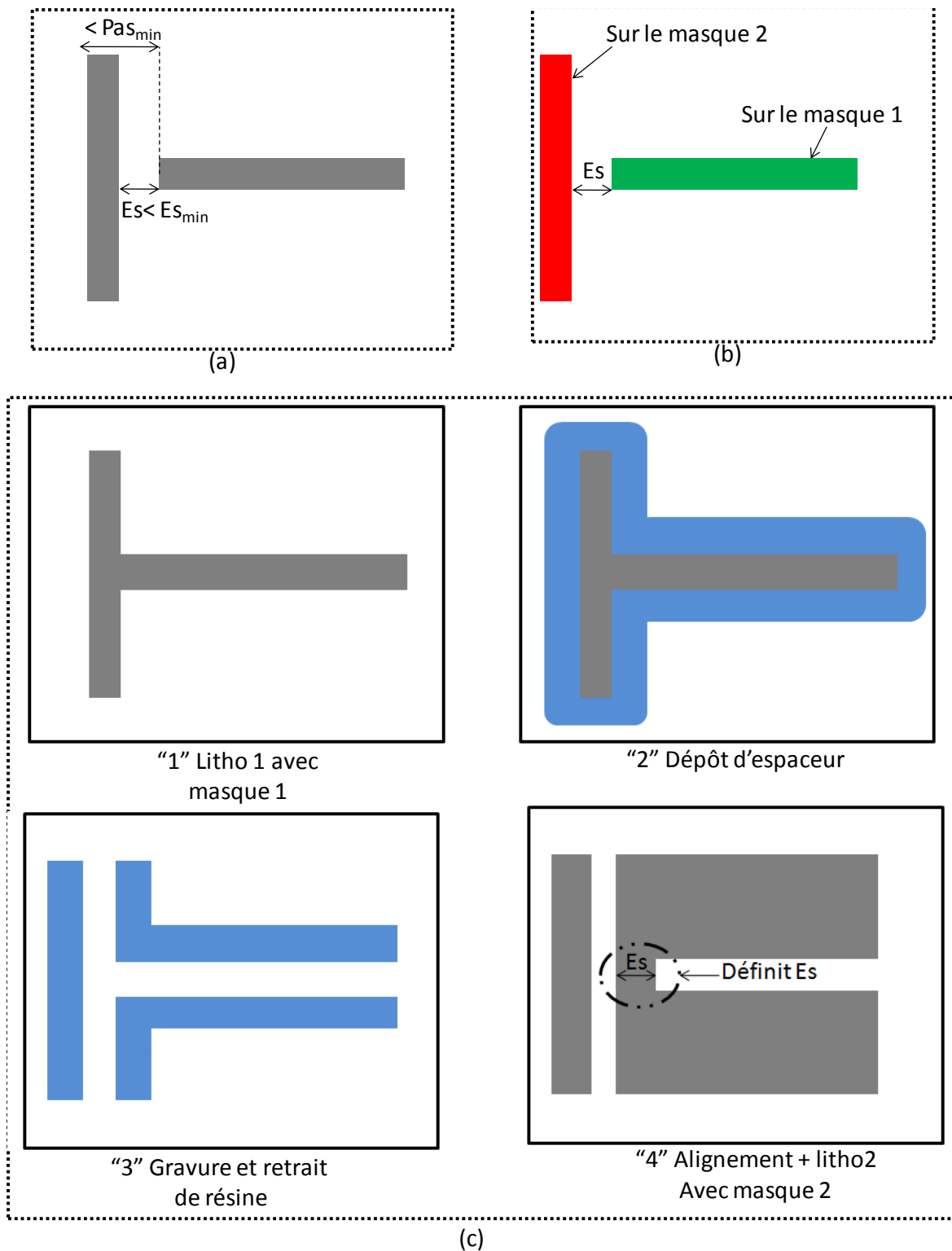


Figure 2.9. a) exemple de structure dessinée en dessous de la résolution lithographique, b) décomposition directe ( $E_s$  impacté par litho1, litho2 et l'alignement des 2 masques), c) impression par décomposition indirecte ( $E_s$  impacté par litho 2)

### 2.1.3 Comparaison des procédés

Le Tableau 2.1 représente une comparaison entre les techniques proposées pour la double impression des circuits dessinés en dessous de la résolution lithographique. La réalisation des motifs d'un niveau du circuit intégré par double impression consiste à choisir la technique à utiliser (directe ou indirecte) et ce choix dépend des règles de dessin du circuit et du budget visé en termes de CDU.

	Impression par decomposition directe		Impression par decomposition indirecte
	LELE	LLE	
Etapes du procédé	2lithos+ 2gravures	2lithos+ 1gravure +1 procédé de gèle	2litho+ dépôt d'espaceur + 2gravure
Alignement des masques critique pour le doublement de pas	Oui	Oui	Non
Qu'est ce qui contrôle le CDU des lignes?	Litho 1 et 2 + alignement	Litho 1 et 2 + alignement	Litho 1 + l'espaceur
Qu'est ce qui contrôle le CDU des espacements 1D?	Litho 1 et 2 + alignement	Litho 1 et 2 + alignement	L'espaceur+ alignement
Qu'est ce qui contrôle le CDU des espacements 2D?	Litho + alignement des masques	Litho + alignement des masques	Litho 2 + l'espaceur + alignement

Tableau 2.1.Récapitulatif des principaux éléments concernant les procédés de décomposition directe et indirecte

Quel que soit la technique utilisée, celle-ci implique le contrôle de l'uniformité de deux populations de lignes et de deux populations d'espacements. De plus, la méthode de décomposition choisie (directe ou indirecte) va impacter la variabilité du CDU des lignes ou des espacements. Pour chaque nœud technologique, la feuille de route ITRS recommande des valeurs de CDU (à  $3\sigma$ ) pour les lignes et pour les espacements qui doivent être atteintes suite au procédé de double impression. Le tableau 2.2 résume les CDU des lignes et des espacements visés et atteints actuellement pour le nœud technologique 22nm, par les différentes techniques de double impression qu'on vient de voir (75). D'après le tableau 2.2, on remarque que le CDU des lignes est globalement bien contrôlé avec les techniques d'impression par décomposition directe ou indirecte. Cependant, le CDU des espacements est beaucoup mieux contrôlé avec la technique d'impression par décomposition indirecte plutôt qu'avec la technique d'impression par décomposition directe.



En effet, en décomposition indirecte, on arrive à atteindre un CDU des espacements jusqu'à 2.8nm alors que celui visé est à 4.2nm.

	Décomposition directe LELE		Décomposition directe LLE		Décomposition indirecte	
	Ligne	Espacement	Ligne	Espacement	Ligne	Espacement
Budget CDU(nm)	3.1	3.9	3.0	4.0	2.1	4.2
CDU(nm) réalisé	2.3	3.8	2.2	3.5	1.6	2.8

Tableau 2.2. Récapitulatif des performances en termes de CDU(à  $3\sigma$ ) pour les différentes techniques de double impression (72)

La technique d'impression par décomposition indirecte est plus robuste d'un point de vue procédé (meilleur CDU) que la technique d'impression par décomposition directe (76). Par ailleurs, le choix de la technique implique des contraintes sur les règles de dessin. En effet, comme on l'a vu précédemment, chaque technique d'impression est définie par ses propres règles de dessin définissant la géométrie des motifs sur les masques. C'est pour cette raison qu'on ne peut pas dire, d'une manière absolue, qu'une technique est meilleure que l'autre. Si on reprend l'exemple de la structure vue précédemment et qui peut être réalisée par les deux techniques de double impression, directe ou indirecte. La technique d'impression par décomposition directe montrée en Figure 2.10.a implique trois règles d'espacements :

- Es1 est l'espacement entre un bout de ligne et le côté d'une autre ligne dessinés sur un même masque.
- Es2 est l'espacement entre un bout de ligne et le côté d'une autre ligne dessinés sur deux masques différents.
- Es3 est l'espacement continu entre les côtés de deux lignes dessinées sur deux masques différents.

Tandis que la technique d'impression par décomposition indirecte montrée en Figure 2.10.b implique seulement deux règles d'espacement :

- Es1' est l'espacement généré entre les bouts de lignes et le côté d'une ligne. Cet espacement est généré lors de la quatrième étape technologique de cette technique. Il est égal à la largeur des lignes définies sur le deuxième masque d'exposition.
- Es3' est l'espacement continu entre les côtés de deux lignes défini lors de la troisième étape technologique de cette technique. Il est égal à la largeur du matériau espaceur déposé.

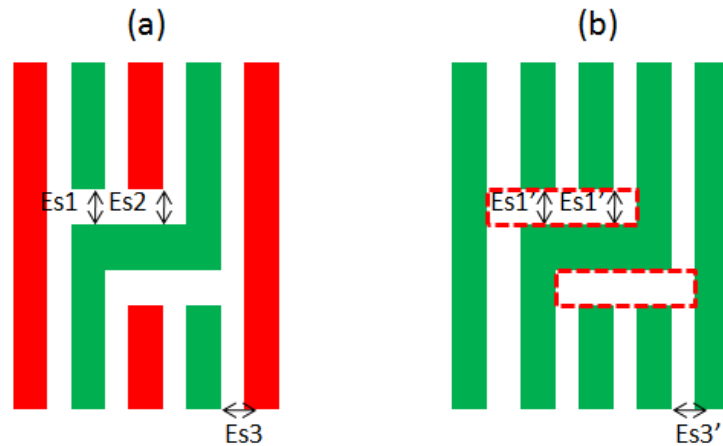


Figure 2.10. Règles de dessin en termes d'espacements : a) pour une double impression par décomposition directe, c) pour une double impression par décomposition indirecte

L'impression de ce type de structure dépend essentiellement de la valeur de l'espacement  $Es1$ . Dans le cas où  $Es1$  est inférieur à l'espacement minimal de résolution, cette structure ne peut plus être imprimée par décomposition directe. Elle ne peut être réalisée que par le procédé d'impression par décomposition indirecte qui peut définir un espacement  $Es1'$  plus petit que l'espacement minimal. En effet, l'espacement  $Es1'$  sur la Figure 2.10.b est défini lors de la deuxième lithographie du procédé qui image les motifs du masque montré en traits rouge sur la Figure 2.10.b et dont les dimensions peuvent être petites. Cependant, dans le cas où l'espacement  $Es1$  est supérieur ou égale à l'espacement minimal de résolution, la structure peut être réalisée avec l'une des deux techniques d'impression : par décomposition directe ou indirecte.

Nous venons de présenter dans la partie 2.1, les différents procédés lithographiques permettant la double impression des motifs dessinés en-dessous de la limite de résolution des outils lithographiques actuels. Quelque soit le procédé lithographique choisi, celui-ci nécessite la décomposition des motifs en deux masques en vue d'une double impression. Bien qu'il existe deux méthodes de décomposition (directe et indirecte) pour la double impression, les travaux de cette thèse ont été réalisés dans le cadre de la décomposition directe. Actuellement, une autre thèse portant sur la décomposition indirecte est en cours de préparation à STMicroelectronics. Les paragraphes suivants sont consacrés au cœur de la double impression : la décomposition. Nous présenterons le principe des algorithmes de décomposition, puis nous passerons à l'application de la décomposition du niveau contacts d'un circuit intégré donné.

## 2.2 Théorie de la décomposition pour la double impression

Les algorithmes de décomposition pour la double impression reposent sur la théorie des graphes (77) (78). Dans la littérature l'approche la plus couramment utilisée pour la décomposition est une approche géométrique (79) (80) basée sur des contraintes géométriques (espacements ou pas des motifs). Dans la section 2.2.1, nous allons présenter quelques généralités sur les graphes et voir comment générer un graphe à partir d'un dessin de circuit. Ensuite, dans la section 2.2.2, nous verrons comment décomposer (colorier) un graphe en vue d'une double impression.

### 2.2.1 Génération d'un graphe à partir d'un dessin de circuit

Soit le dessin d'un circuit formé de 4 polygones montrés en Figure 2.11.a. Dans ce cas, les polygones sont des contacts carrés. La construction du graphe correspondant à cette structure repose sur la définition des nœuds ainsi que des arêtes reliant ces nœuds entre eux. Dans un graphe, chaque polygone étant défini par un nœud et deux nœuds ( $i$  et  $j$ ) sont reliés entre eux par une arête de longueur  $l_{ij}$ . L'ensemble des nœuds reliés entre eux par des arêtes constitue un graphe  $G$ . Si les arêtes sont orientées, on parle alors de graphe orienté comme montré en Figure 2.11.b. Dans ce cas, chaque arête (représentée par une flèche) est définie par une origine et une extrémité. Lorsque les arêtes ne sont pas orientées comme le montre la Figure 2.11.c, on parle alors de graphe non orienté. Dans cette thèse, on ne s'intéresse qu'au cas de graphes non orientés. Le cas des graphes orientés (81), dans lesquels le chemin permettant de parcourir tous les nœuds du graphe est fixé, au départ, lors de la définition du graphe ne concerne pas la décomposition ou le bi-coloriage d'un circuit.

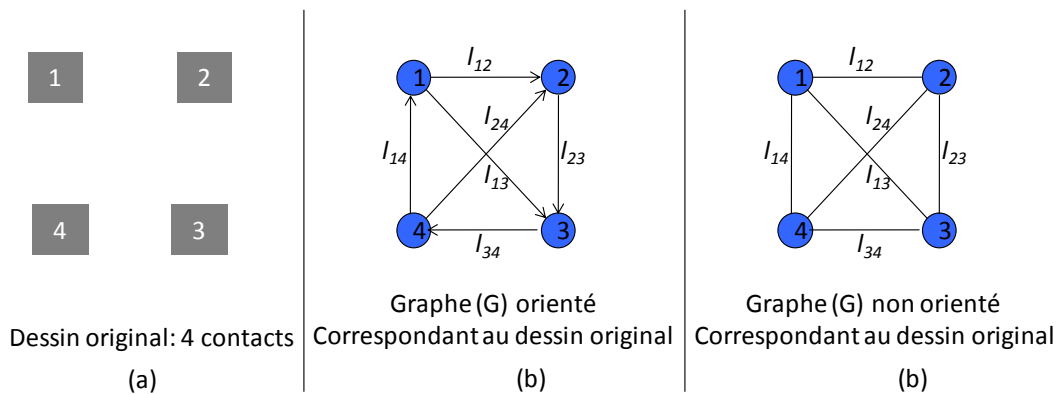


Figure 2.11. a) Exemple d'un dessin original constitué de 4 contacts, b) génération d'un graphe orienté correspondant aux 4 contacts, c) génération d'un graphe non orienté correspondant aux 4 contacts.

La définition des arêtes d'un graphe est réalisée lors de l'étape de minimisation du cycle de parcours de toutes les arêtes du graphe. En pratique, la minimisation du cycle de parcours des arêtes d'un graphe non orienté est basée sur la résolution du problème du postier chinois bien connu en théorie des graphes (82). Le problème du postier chinois a été formulé pour la première fois en 1962, par Mei-Ko Kwan (83). Ce mathématicien de l'université de Shantung fut quelque temps postier durant la révolution culturelle chinoise. Il s'agissait alors pour lui de trouver la distance de marche minimale pour distribuer son courrier dans un certain nombre de rues dont il connaissait les « longueurs », puis de revenir à son point de départ. Dans le cas concret du postier chinois, les arêtes et les nœuds du graphe représentent les rues et les intersections entre les rues respectivement. Il faut alors trouver un chemin parcourant toutes les arêtes pour revenir au point de départ, tel que le chemin total du parcours soit minimal. Il existe dans la littérature plusieurs méthodes algorithmiques permettant de rechercher un chemin de longueur minimale entre les nœuds d'un graphe (84) (85). Dans ce manuscrit, nous n'allons pas les détailler, mais le lecteur pourra trouver tous les détails dans les travaux présentés en (86). Pour la suite de ce manuscrit, il faut garder l'idée que la recherche du chemin le plus court pour parcourir les nœuds d'un graphe permet de définir les longueurs des arêtes du graphe. C'est sur ces longueurs qu'est basée la décomposition du graphe qu'on propose de discuter dans la section suivante.

### **2.2.2 Décomposition d'un graphe**

Un graphe  $G$  est dit "k-colorable" si à chaque nœud peut être associé une couleur de l'ensemble  $k$  de telle manière que deux nœuds reliés par une arête ne portent pas la même couleur (87). Avant de commencer le processus du coloriage d'un graphe il faut d'abord fixer deux paramètres important :

- Le nombre de couleurs à utiliser. Dans notre cas, deux couleurs sont utilisées représentant les deux masques d'exposition pour la technique de double impression.
- La longueur critique du coloriage (ou de décomposition). Elle est définie par l'utilisateur en tenant en compte le nœud technologique et les conditions lithographiques.

Colorier un graphe en utilisant deux couleurs différentes, consiste à attribuer une couleur à chaque nœud du graphe. Cela est équivalent à affilier chaque nœud du graphe à un masque ou à un autre. La décomposition en deux masques se fait en deux étapes.

La première étape consiste à colorier (décomposer) les nœuds critiques. Deux nœuds voisins sont dit critiques si leur espacement est inférieur ou égal à la longueur critique de décomposition. Deux nœuds critiques vont être affectés simultanément à deux couleurs différentes ou deux masques différents comme montré sur la Figure 2.12. C'est la première priorité à respecter lors de la décomposition. A ce stade, le problème de résolution des deux masques générés est résolu. En effet, sur les deux masques générés, tous les espacements entre les nœuds sont supérieurs à la longueur critique de décomposition.

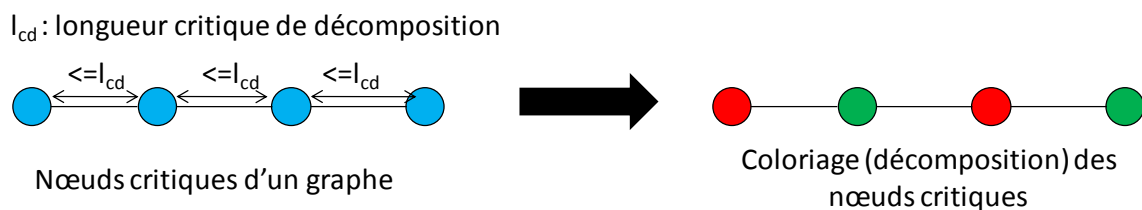


Figure 2.12. Le coloriage des nœuds critiques dans un graphe donné est basé sur la longueur critique de décomposition

La deuxième étape consiste à colorier les nœuds non critiques, c'est-à-dire, ceux dont les espacements sont supérieurs à la longueur critique de décomposition. Les nœuds non critiques peuvent théoriquement être affiliés à n'importe quel masque. Toutefois, les besoins industriels nécessitent l'homogénéisation entre les deux masques générés permettant d'avoir un taux d'ouverture (densité) équivalent entre les deux masques. Ceci est nécessaire pour faciliter les étapes de fabrication ultérieures (écriture du masque, étape de polissage,...). L'homogénéisation des deux masques générés consiste à colorier les nœuds non critiques. Elle se traduit par le fait que les deux masques doivent d'une part contenir plus ou moins le même nombre de points et d'autre part ils doivent avoir des environnements plus ou moins identiques. Générer des environnements plus ou moins identiques entre les deux masques revient à élargir au maximum les espacements entre les nœuds pour garantir des performances lithographiques similaires entre les deux masques. La Figure 2.13 est un exemple montrant le principe de cette homogénéisation et comment choisir la meilleure décomposition entre plusieurs possibilités existantes.

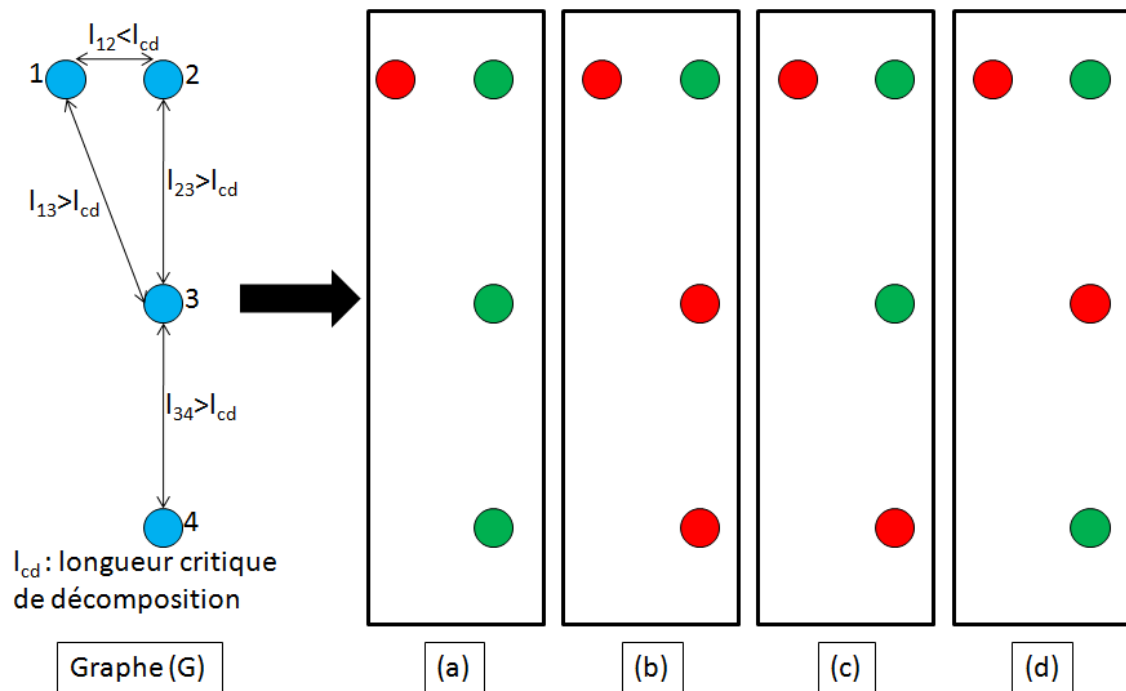


Figure 2.13. Différentes possibilités de coloriage d'un graphe donné ; a) et b) la densité des nœuds n'est pas homogène entre les deux masques ; c) et d) la densité entre les deux masques est homogène mais l'espacement entre les nœuds en (d) est plus élargit qu'en (c)

Dans le graphe, les deux nœuds voisins 1 et 2 ont un espacement ( $l_{12}$ ) inférieur à la longueur critique de décomposition, donc ces deux nœuds sont affectés à deux masques différents : c'est la première priorité de la décomposition. Ensuite, les nœuds 3 et 4 ont un espacement ( $l_{34}$ ) plus grand que la longueur critique de décomposition, cela veut dire qu'ils peuvent être mis sur le même masque (Figure 2.13.a et Figure 2.13.b). Cependant, dans ces cas précis, la densité des nœuds entre les deux masques générés n'est pas homogène : 3 nœuds sur un masque et 1 seul point sur l'autre. Ainsi, les possibilités a et b sont immédiatement rejetées.

Les possibilités montrées en Figure 2.13.c et en Figure 2.13.d respectent la première priorité de décomposition ainsi que la génération d'une densité équivalente entre les deux masques, soit deux nœuds par masque. Cependant, la décomposition montrée en Figure 2.13.d offre un espacement entre les nœuds plus grand que dans la décomposition présentée sur la Figure 2.13.c. En effet, l'espacement  $l_{13}$  est plus grand que l'espacement  $l_{23}$  et l'espacement  $l_{24}$  est plus grand que l'espacement  $l_{23}$ .

Au final, la meilleure décomposition parmi les quatre proposées est celle présentée en Figure 2.13.d. En effet, c'est elle qui respecte la règle de la longueur critique de décomposition, l'homogénéité de la densité des deux masques ainsi que l'élargissement maximal des espacements entre les nœuds du graphe.

Toutefois, la complexité du coloriage des nœuds d'un graphe donné dépend essentiellement du nombre de nœuds à décomposer et de leurs configurations géométriques. Plus il y a de nœuds à colorier plus le coloriage sera long à réaliser. De plus, la décomposition est parfois compliquée à réaliser, voir impossible, sur certaines configurations dites de conflit, c'est ce qu'on propose de discuter dans la section suivante.

## 2.2.1 Les conflits de décomposition

### 2.2.1.1 Présentation du problème

Pour expliquer les conflits de décomposition, considérons le dessin de la structure du niveau lignes montré sur la Figure 2.14.a. L'espacement entre les lignes de cette structure est inférieur à l'espacement critique (minimal) résolu lors d'un procédé lithographique. Par conséquent cette structure doit être décomposée sur deux masques différents afin qu'elle puisse être imprimée par double impression. En pratique, celui-ci est fixé en fonction du nœud technologique et des conditions lithographiques (source, résine, masque,...). La décomposition des lignes de la structure montrée en Figure 2.14.a revient à décomposer, en se basant sur l'espacement critique, le graphe correspondant à cette structure et qui est représenté sur la Figure 2.14.b. Les nœuds du graphe représentent les trois lignes (polygones) et les longueurs d'arêtes reliant les nœuds représentent l'espacement entre les lignes.

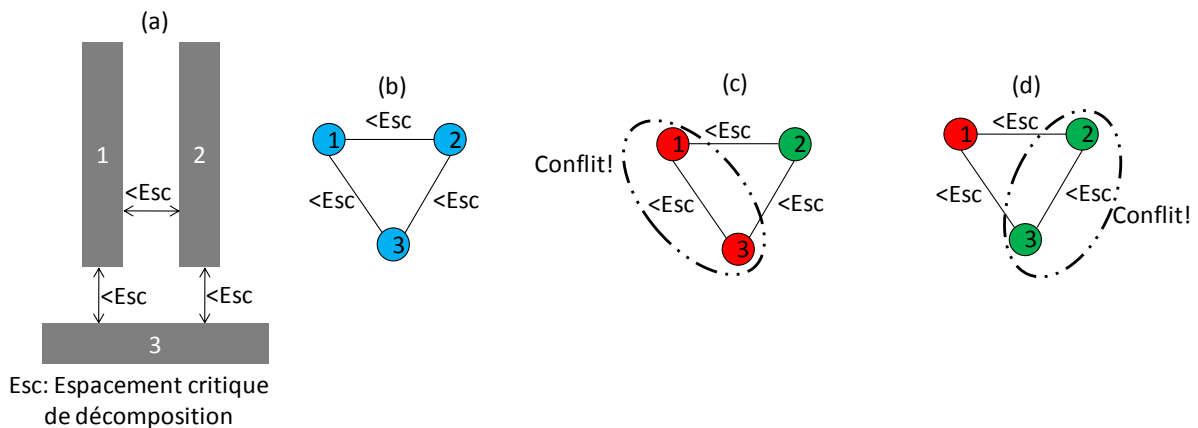


Figure 2. 14 a) Exemple de structure, du niveau lignes, à décomposer, b) Graphe associé à cette structure, génération de conflit lors de la décomposition : c) les nœuds 1 et 3 ne peuvent pas être mis sur le même masque à cause de l'espacement critique les séparant, d) les nœuds 2 et 3 ne peuvent pas être mis sur le même masque à cause de l'espacement critique les séparant

Toutefois, la décomposition du graphe montré en Figure 2.14.b est impossible en utilisant deux masques (deux couleurs) seulement. En effet, les nœuds 1 et 2 peuvent être affiliés simultanément aux deux masques. Cependant, le nœud 3 ne peut être affilié à aucun des deux masques au risque de garder toujours un espacement critique sur l'un des deux masques et de violer donc la première priorité de décomposition. En effet, il existerait toujours sur l'un des deux masques, deux nœuds espacés d'un espacement critique :

- Soit les nœuds 1 et 3, c'est-à-dire les polygones 1 et 3, sont mis sur le même masque et le nœud 2 est mis sur l'autre masque (voir Figure 2.14.c).
- Soit les nœuds 2 et 3, c'est-à-dire les rectangles 2 et 3, sont mis sur le même masque et le nœud 1 est mis sur l'autre masque (voir Figure 2.14.d).

Deux polygones espacés d'un espacement critique vont ponter lors de l'impression s'ils sont imagés sur un même masque (voir Figure 2.15). Les pontages entre les motifs sont dangereux car ils peuvent nuire au bon fonctionnement électrique du circuit intégré.

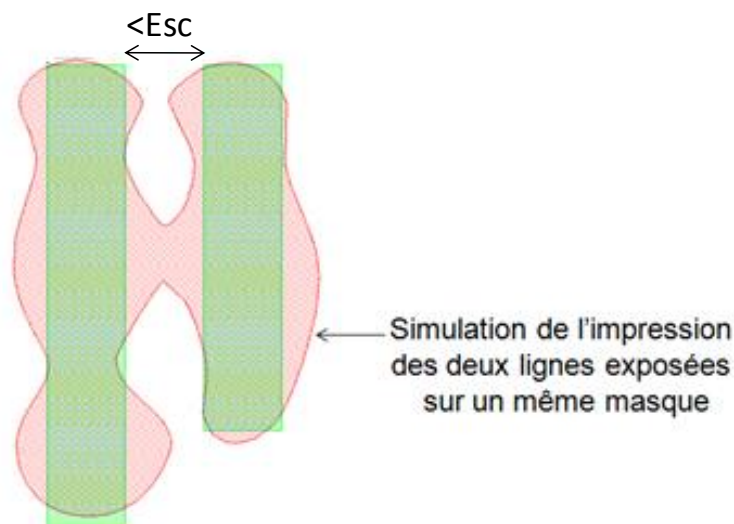


Figure 2. 15 Simulation de l'impression de deux lignes voisines espacées d'un espacement critique et imprimées sur le même masque : les deux lignes pontent

Les conflits de décomposition générés par l'association de trois nœuds formant un triangle sont appelés conflit à trois corps (88). Ces conflits sont natifs du dessin du circuit (de l'anglais *Native conflict*). Nous proposons dans la section suivante de discuter une méthode permettant d'éviter l'apparition des conflits à trois corps.



### 2.2.1.2 Comment éviter les conflits de décomposition ?

Considérons à nouveau le cas de conflit présenté en Figure 2.14.c, le raisonnement qui va suivre peut aussi être appliqué à l'autre cas de conflit montré en Figure 2.14.d. Il existe deux solutions permettant de s'affranchir de ce conflit de décomposition. La première solution consiste à couper le rectangle 1 représenté par le nœud 1 et la deuxième solution consiste à couper le rectangle 3 représenté par le nœud 3. Le but de cette opération de coupure de polygones est de définir de nouveaux rectangles et donc un nouveau graphe qui serait décomposable.

Dans le cas où le rectangle numéro 1 est coupé en deux rectangles 1' et 1'' comme montré en Figure 2.16.a, cela permet de générer une nouvelle structure contenant quatre polygones (1', 1'', 2 et 3). Le graphe associé à cette nouvelle structure est montré en Figure 2.16.b. Notons que sur ce graphe, et c'est le cas pour tous les graphes générés à partir de lignes, les nœuds des lignes 1' et 1'' ne sont pas reliés entre eux par une arête car ces polygones se touchent (voir Figure 2.16.a). Le fait de couper le polygone numéro 1 génère une nouvelle structure dont le graphe ne peut toujours pas être décomposable en utilisant deux couleurs seulement (voir Figure 2.16.b). En effet, il existe toujours trois nœuds (1'', 2 et 3) dont les arêtes sont reliées entre elles formant un conflit à trois corps. Dans ce cas, la décomposition en deux masques est impossible car il existerait toujours sur un des deux masques, deux rectangles espacés d'un espacement critique (voir Figure 2.16.c). Par conséquent, couper le polygone numéro 1 ne permet pas de résoudre le conflit de décomposition.

La deuxième solution consiste à couper le polygone numéro 3 en deux rectangles 3' et 3''. Ceci génère une nouvelle structure composée de quatre rectangles (1, 2, 3' et 3'') et montrée en Figure 2.16.d. Le graphe associé à cette nouvelle structure est montré en Figure 2.16.e. Dans ce cas, le conflit à trois corps a été supprimé. En effet, d'après la Figure 2.16.e, les nœuds du graphe sont liés entre eux mais ne forment jamais de conflit à trois corps. Ainsi, la décomposition de la structure est possible dans ce cas et elle est montrée en Figure 2.16.f. Notons que dans ce cas, on considère que les espacements entre les coins de bouts de lignes montrés sur la Figure 2.17 doivent être supérieurs à l'espacement critique pour que les polygones du niveau lignes soient résolus.

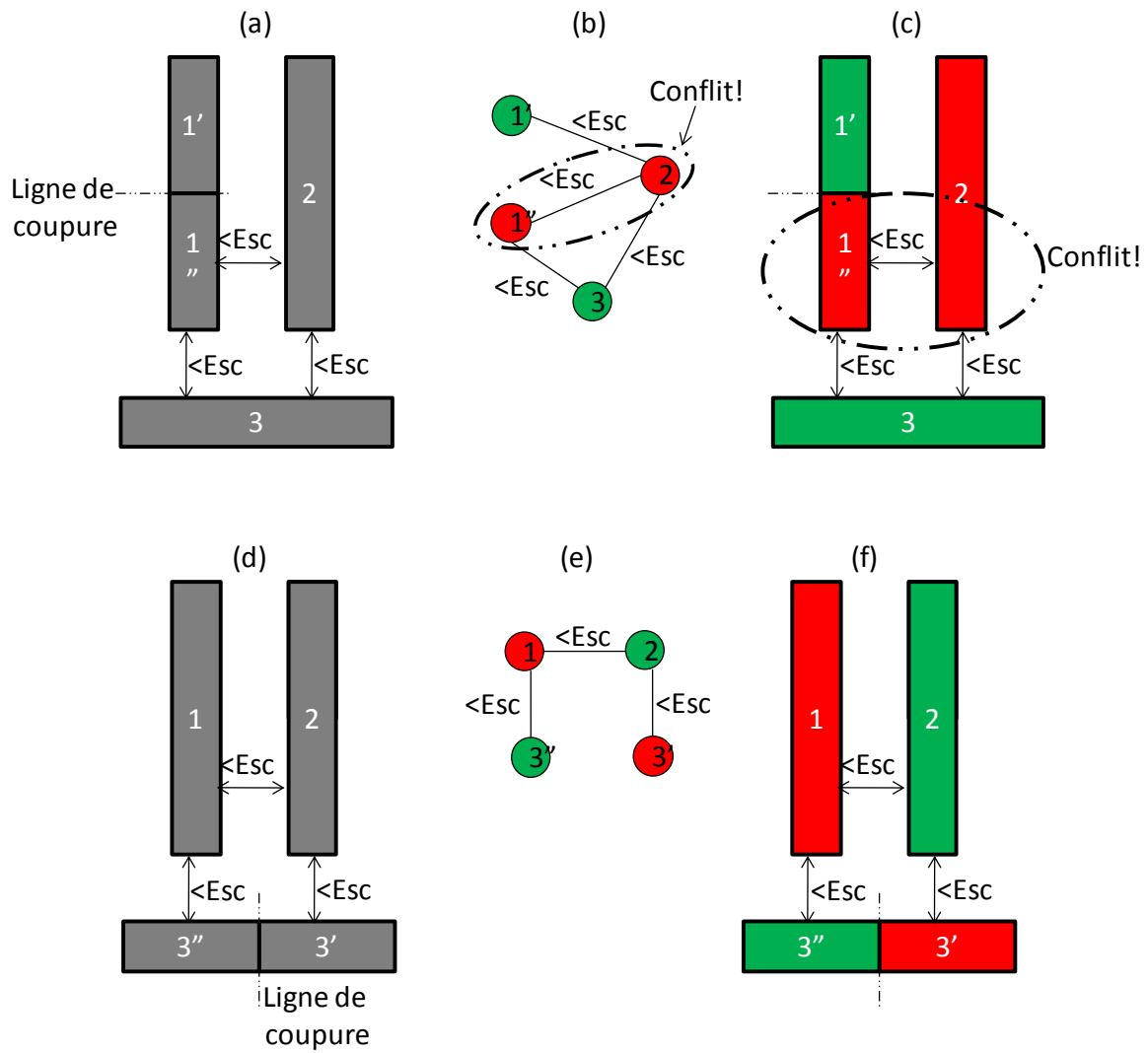


Figure 2. 16 a) Polygone 1 coupé, b) décomposition du graphe associé impossible (présence d'un conflit à 3corps), c) décomposition de la structure impossible, d) polygone 3 coupé, e) graphe associé permettant la décomposition car le conflit à trois corps a été supprimé, f) proposition d'une décomposition.

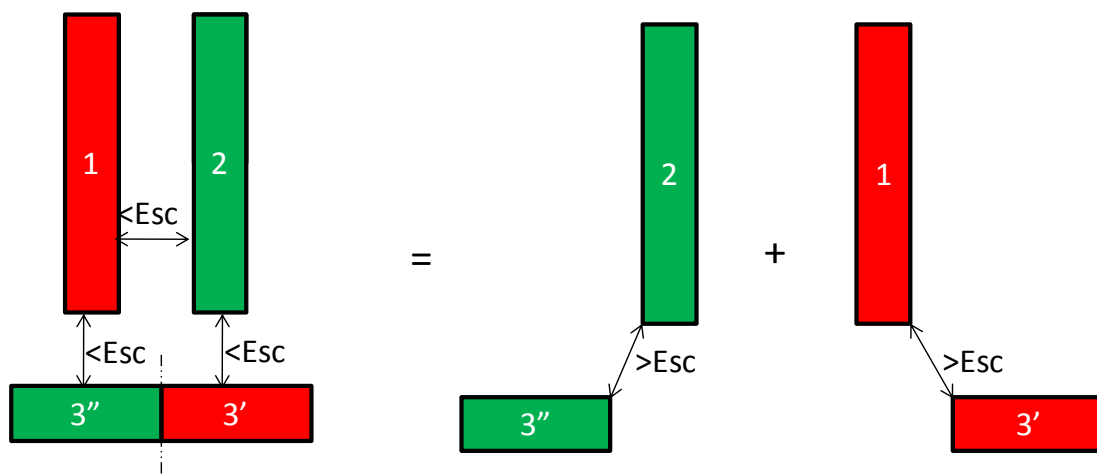


Figure 2. 17 Existence de la solution de décomposition de la structure étudiée à condition que les espacements entre les coins des bouts de lignes sur chacun des deux masques soient supérieurs à l'espacement critique (minimal).

D'autre part, si le fait de couper le polygone numéro 3 de la structure permet de s'affranchir du conflit à trois corps, la question qui se pose alors est : comment savoir où placer le site de coupure ? Dans l'exemple discuté précédemment, le polygone numéro 3 a été coupé en son milieu. Toutefois, il existe en réalité plusieurs sites de coupure possibles permettant de couper le polygone numéro 3 afin de s'affranchir du conflit à trois corps pour rendre la décomposition possible. Dans l'exemple étudié ici, ces sites de coupure sont définis dans l'espacement entre les côtés adjacents des polygones 1 et 2 comme il est montré en Figure 2.18.a.

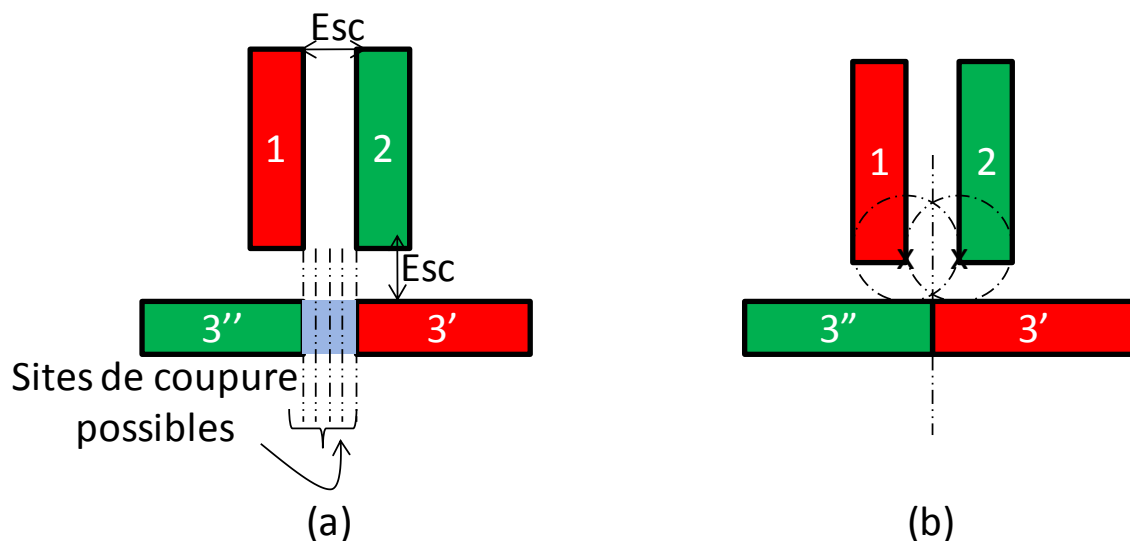


Figure 2.18 a) différents site de coupure possibles pour s'affranchir du problème de décomposition, b) définition géométrique du site de coupure optimal

Théoriquement, n'importe quel site choisi parmi ceux montrés en Figure 2.18.a permet de s'affranchir du problème de décomposition et de générer deux masques contenant des polygones dont les pas sont supérieurs au pas critique. Cependant, la mesure du pas dans un dessin de circuit se fait d'une manière euclidienne. Ainsi, la manière de choisir le site de coupure optimal, celui qui génère des polygones de la même longueur sur les deux masques, est basée sur une simple construction géométrique. Le site de coupure optimal est réalisé au milieu du rectangle 3 comme il est montré en Figure 2.18.b. Le site de coupure optimal est défini par les deux points d'intersection des deux cercles ayant comme centres les coins des deux lignes verticale montrés en Figure 2.18.b par des « x » et de rayon égal à l'espacement des lignes de la structure.

Bien que cette technique de coupure de polygones est souvent rencontrée lors de la décomposition du niveau lignes d'un circuit intégré, celle-ci implique un challenge supplémentaire au procédé lithographique de double impression. En effet, après recombinaison des deux masques lors du procédé de double impression, il faudra retrouver la forme initiale du polygone. Le fait de couper un polygone et d'imprimer ses fragments sur deux masques différents implique une impression délicate et très compliquée autour de la zone de découpe. En effet, à cause des sévères effets de proximité optique, l'impression des bouts de lignes est critique comme le montre la Figure 2.19.

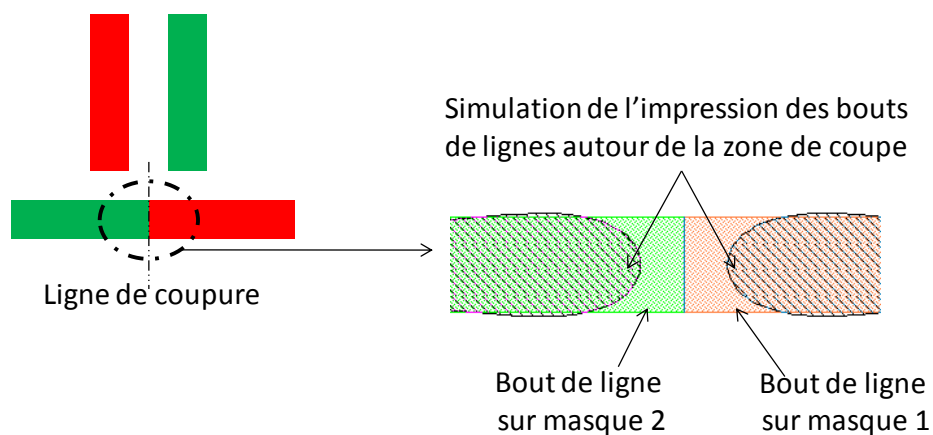


Figure 2.19. Simulation de l'impression des deux polygones autour de la zone de découpe.

Afin de garantir une impression fidèle au polygone d'origine autour de la zone de découpe, on applique une seconde opération sur le polygone coupé. Cette opération s'appelle recouvrement (de l'anglais *stitching*), elle consiste à définir autour de la zone de coupure des bouts de lignes plus longs de manière à générer un recouvrement entre les bouts de lignes (voir Figure 2.20). Ces zones de recouvrement vont être doublement exposées, lors du procédé de double impression, et vont permettre de garantir une impression fidèle au polygone d'origine autour de la zone de coupure.

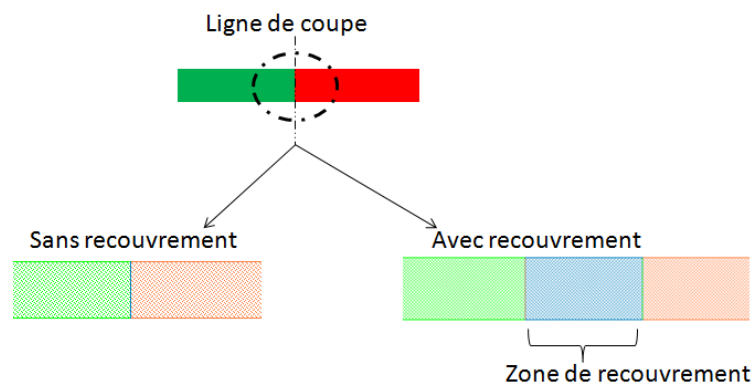


Figure 2.20. Réalisation du recouvrement au niveau de la zone de coupure d'un polygone

La largeur de la zone de recouvrement doit être suffisante pour éviter des défauts d'impression à la fin du procédé de double impression. La Figure 2.21.a montre une ligne coupée générant deux lignes qui seront exposées sur deux masques différents. Les Figures 2.21.b, c et d montrent des simulations de l'impression des deux lignes avec des largeurs de la zone de recouvrement de : 5nm, 20nm et 40nm respectivement.

On remarque que plus la zone de recouvrement est grande plus les contours d'impression des bouts de lignes autour de la zone de coupure se rapprochent entre eux. Dans cet exemple, les valeurs de la largeur de la zone de recouvrement : 5nm, 20nm et 40nm ne sont pas suffisantes pour permettre d'obtenir une impression fidèle autour de la zone de coupure. En effet, l'impression des deux bouts de ligne, dans le cas d'une largeur de recouvrement de 5nm et de 20nm, génère un espace autour de la ligne de coupure (voir la Figure 2.21.b et la Figure 2.21.c). Dans le cas d'une zone de recouvrement de largeur 40nm, l'impression des deux bouts de ligne présente un risque de pincement au niveau de la ligne de coupure (voir la Figure 2.21.d). La Figure 2.21.e montre la simulation de l'impression des deux bouts de ligne pour une largeur de la zone de recouvrement de 60nm. Dans ce cas, cette largeur de la zone de recouvrement est suffisante pour une impression fidèle au motif original.

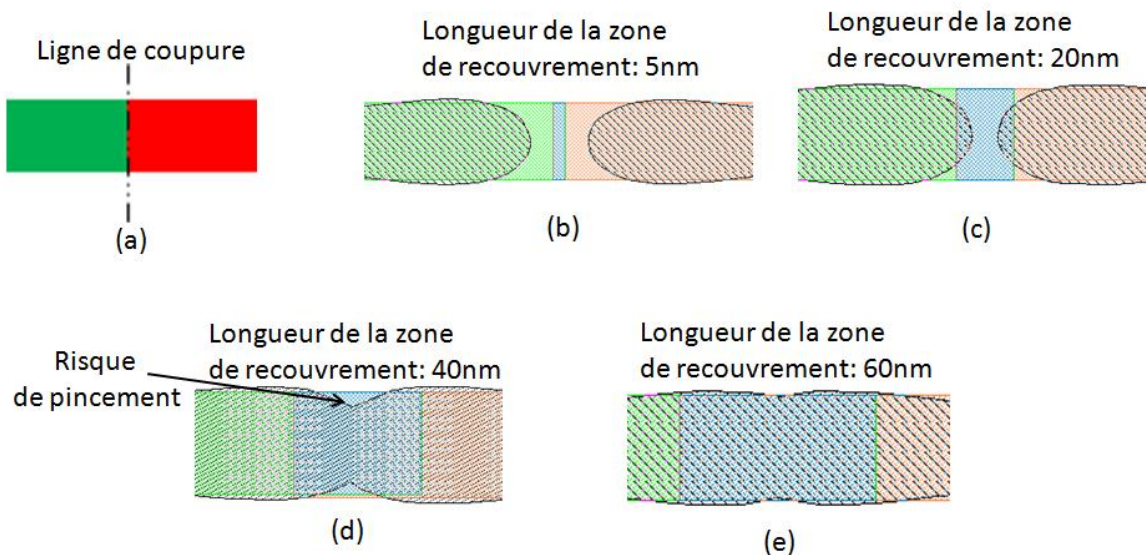


Figure 2.21. a) Ligne originale coupée au milieu et générant deux lignes. Simulation de l'impression des deux lignes après double impression avec différentes valeurs de la zone de recouvrement: b) 5nm, c) 20nm, d) 40nm, e) 60nm.

Le recouvrement est un point critique à prendre en compte lors du procédé de double impression. Il n'est pas simple à définir car il nécessite une étude préalable pour définir les recouvrements nécessaires entre les bouts de ligne des deux masques complémentaires autour des zones de coupure. Ce qui signifie une étape supplémentaire, lourde en termes de simulations, pour définir le recouvrement nécessaire au niveau des zones de coupure dans le but de garantir une impression fidèle au dessin original lors du procédé de double impression. C'est pour cette raison que dans un circuit complexe, la meilleure décomposition est celle qui minimise le nombre de sites de recouvrement. En effet, minimiser les sites de recouvrement revient à minimiser les sites de coupure des polygones qui rendent l'impression critique dans ces zones.

En pratique, couper des polygones pour s'affranchir des conflits à trois corps est une opération propre à la décomposition du niveau lignes des circuits à imprimer par double impression. Cependant, cette façon de faire n'est pas appliquée au niveau contacts qui sont des motifs de taille plus petite que celle des lignes. Par conséquent, les fabricants des semi-conducteurs concevant eux même leurs circuits doivent éviter l'apparition des conflits à trois corps lors de la conception du dessin du niveau contacts pour que celui-ci soit décomposable. La partie suivante est consacrée à la décomposition du niveau contacts.

## 2.3. Décomposition du niveau contacts

La décomposition du niveau contacts des circuits intégrés est basée sur le pas critique. Le pas est défini comme étant la somme de la dimension critique (CD) et de l'espacement entre deux motifs. La mesure du pas, dans un dessin de circuits, est euclidienne et la manière de le mesurer, pour le niveau contact, est montrée sur la Figure 2.22. Dans ce cas, le pas est aussi la distance de centre à centre qui se mesure d'une manière euclidienne.

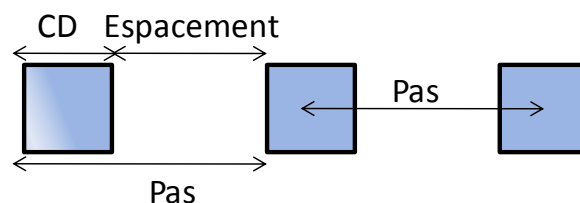


Figure 2. 22 Mesure du pas dans un circuit pour le niveau contact

Les algorithmes de décomposition, présents sur le marché actuellement, et dédiés à la décomposition du niveau contacts sont basés sur le pas minimal (pas critique). Ce pas critique est le pas minimal dessiné sur un masque et résolu lors d'un procédé lithographique. Il est fixé en tenant compte de la source utilisée, du masque, de la résine,...

Lorsque le pas entre deux contacts voisins (la distance de centre à centre) est plus petit que le pas critique, alors ces deux contacts sont dits critiques car ils risquent de ponter (fusionner) s'ils sont exposés sur un même masque. Les couples de contacts dont le pas est inférieur au pas critique vont être affectés simultanément à deux masques différents (voir Figure 2.23). C'est la première priorité (règle) de la décomposition, son but est de relaxer les contraintes au niveau du pas des motifs sur les deux masques générés. En théorie, après avoir décomposé les contacts critiques, les deux masques générés peuvent être résolus lors d'un procédé lithographique. En effet, à ce stade de la décomposition, tous les pas des motifs présents sur chacun des deux masques sont supérieurs au pas critique.

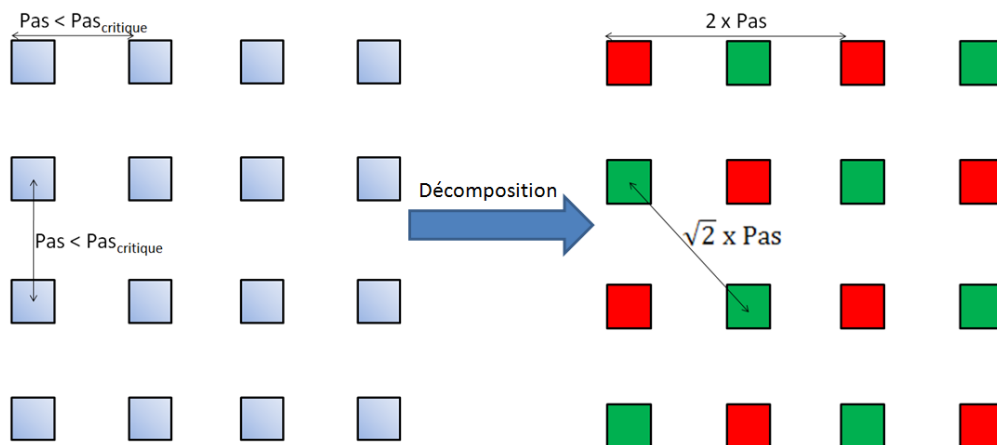


Figure 2.23. Principe de décomposition des contacts critiques

Les contacts dont le pas est plus grand que le pas minimal ne sont pas critiques et vont donc être soumis à la deuxième priorité de la décomposition, vu précédemment, à savoir l'homogénéisation. Les contacts non critiques vont être affiliés à un masque ou à un autre dans le but de générer, à la fin de la décomposition, deux masques avec une densité de contacts équivalente (homogène) et de maximiser les pas au maximum possible.

Considérons par exemple les trois contacts montrés en Figure 2.24.a. Le pas des contacts 1 et 2 est critique, alors que le pas des contacts 1 et 3 ainsi que le pas des contacts 2 et 3 ne sont pas critique. La décomposition de la structure montrée en Figure 2.24.a présente deux solutions possibles reportées sur la Figure 2.24.b et la Figure 2.24.c. Dans la première décomposition montrée en Figure 2.24.b, le contact 3 est mis sur le même masque que le contact 1 présentant une configuration appelée « diagonale », elle est entourée sur la Figure 2.24.b. Notons que nous appelons cette configuration diagonale bien que ces deux contacts ne soient pas tout à fait sur la même diagonale. Dans la deuxième décomposition montrée en Figure 2.24.c, le contact 3 est mis sur le même masque que le contact 2 présentant ainsi une configuration appelée « manhattan », elle est entourée sur la Figure 2.24.c L'appellation manhattan est par analogie avec les rues du quartier éponyme, c'est-à-dire que les contacts sont l'un à la suite de l'autre sur la même verticale ou sur le même axe horizontal.

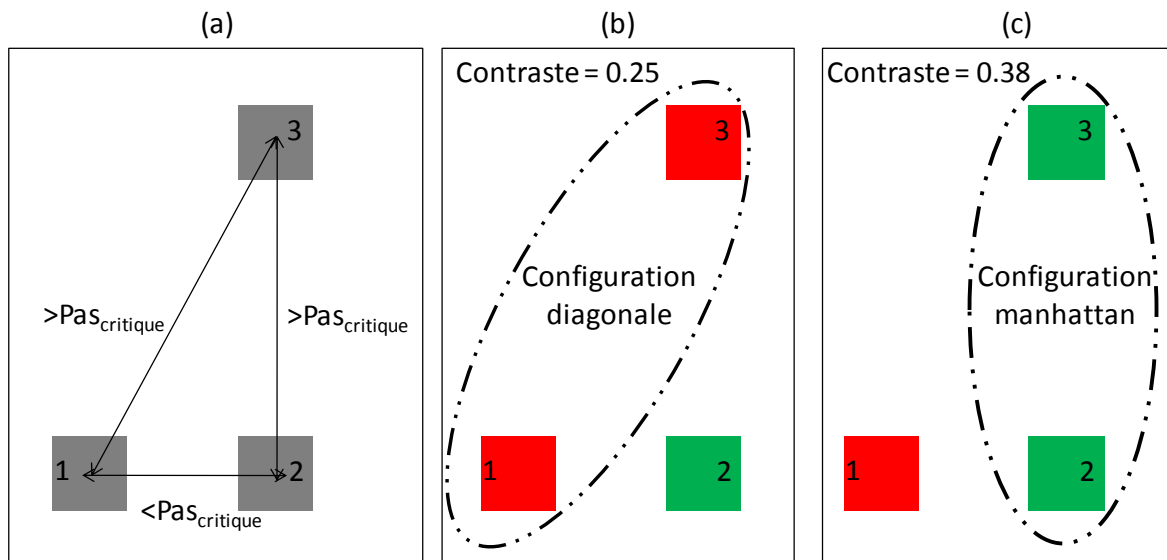


Figure 2. 24 a) structure composée de 3 contacts à décomposer, b) 1<sup>ère</sup> décomposition : les contacts 1 et 3 sont dans une configuration diagonale, c) 2<sup>ème</sup> décomposition : les contacts 2 et 3 sont dans une configuration manhattan

D'un point de vue algorithmique, les pas entre le contact 3 et les contacts 1 et 2 sont supérieurs au pas critique. Ce qui signifie que quelque soit la configuration choisie (diagonale ou manhattan) ces contacts vont être résolus lors d'un procédé lithographique. Cependant, en calculant le contraste de l'image aérienne formée par le contact 3 dans les deux configurations, nous avons constaté une différence de contraste entre les deux cas. Nous avons pris comme conditions de simulation une source quadripolaire (cf. chapitre 1) avec des facteurs de cohérence partielle  $\sigma_{min}/\sigma_{max}=0.6/0.8$  et une ouverture angulaire de chaque pôle de la source  $PO=20^\circ$ ,  $\lambda=193nm$ ,  $NA=1.35$  et un pas de 100nm.



Les simulations de contraste que nous avons réalisées ont montré que le contraste de l'image aérienne du contact 3 dans la configuration manhattan est égal (dans ces conditions) à 0.38 et est plus important que celui obtenu dans la configuration diagonale qui vaut 0.25. Bien que dans les deux configurations, le pas des contacts est supérieur au pas critique, il y aurait ainsi des orientations (des contacts entre eux) qui ont un contraste meilleur que d'autres. D'autre part, il a été établi (89) que la qualité de l'image aérienne formée dépend essentiellement de la capture des ordres de diffraction par la pupille du scanner. C'est le principe de la formation d'image dans un système lithographique (cf. chapitre 1). Nous nous sommes alors penchés sur l'analyse des interactions des ordres de diffraction dans la pupille pour pouvoir expliquer pourquoi le contraste des contacts dont le pas est supérieur au pas critique est différent en fonction de la position des contacts sur le masque.

## 2.4 Objectifs de la thèse

Au début de cette thèse, beaucoup de questions se posaient sur le problème de la technique de double impression. Dans ce chapitre, nous avons vu que quelque soit le procédé de double impression choisi, celui-ci nécessite une décomposition du dessin original du circuit en deux masques d'exposition. Les travaux de cette thèse ont été réalisés dans le cadre de la décomposition qui est, comme on l'a vu dans ce chapitre, basée sur la règle de l'espacement ou du pas critique. Nous nous sommes d'abord intéressés au phénomène de diffraction, principale cause de la formation d'image dans un système lithographique. Le but était de pouvoir comprendre l'origine de la différence de contraste de deux contacts ayant un pas résolu mais disposés dans deux orientations différentes (de l'un par rapport à l'autre). Ensuite, nous nous sommes proposés de développer une méthode permettant d'affilier les contacts non critiques à un masque ou à un autre de manière à augmenter le contraste de chacun des deux masques. Ceci étant dans le but d'améliorer l'impression des deux masques lors du procédé de double impression permettant d'éviter des cas de pontage entre les motifs ou de non impression des motifs.

Cette nouvelle méthode, que nous avons appelée « décomposition optique », est basée sur l'analyse de la figure de diffraction ou encore l'interaction des ordres de diffraction dans la pupille du scanner. L'approche développée dans le cadre de la décomposition optique est différente de celle fournie par des vendeurs de logiciels et présentée dans le chapitre 2.

En plus d'élargir le pas des motifs critiques, la décomposition optique permet d'optimiser l'affiliation des contacts non critiques à un des deux masques d'exposition dans le but d'améliorer, au final, l'impression des deux masques d'exposition. Le chapitre 3 présentera le cadre théorique de la décomposition optique et le chapitre 4 présentera les résultats de l'application de cette nouvelle méthode de décomposition au niveau contacts des circuits du nœud 22nm.



# **Chapitre 3**

## **Analyse de la figure de diffraction et son influence sur les performances lithographiques**

## Sommaire

### *Chapitre 3 Analyse de la figure de diffraction et son influence sur les performances*

<i>lithographiques</i> .....	83
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>85</b>
<b>3.1 Interaction des ondes planes monochromatiques</b> .....	<b>85</b>
3.1.1. Interaction de deux ondes .....	85
3.1.2. Interaction de n ondes .....	89
<b>3.2 Analyse de la figure de diffraction pour un réseau de lignes</b> .....	<b>90</b>
3.2.1. Evolution des interactions entre les ordres de diffraction .....	90
3.2.1.1. Pas d'interaction .....	91
3.2.1.2. Introduction des interférences à deux ordres .....	91
3.2.1.3. Introduction des interférences à trois ordres .....	92
3.2.2. La surface de recouvrement.....	93
3.2.3. Evolution de la surface de recouvrement en fonction du pas du réseau .....	95
<b>3.3 Figure de diffraction pour un réseau de contacts</b> .....	<b>99</b>
<b>3.4 Evolution de la surface de recouvrement pour un réseau de contacts</b> .....	<b>102</b>
3.4.1. Evolution en fonction du pas du réseau .....	102
3.4.2. Evolution en fonction de l'orientation du réseau .....	104
<b>3.5 Méthode de calcul des surfaces de recouvrement</b> .....	<b>112</b>
3.5.1. Avec une source prédéfinie .....	113
3.5.2. Avec une source pixélisée .....	115
<b>3.6 Conclusion</b> .....	<b>118</b>

# INTRODUCTION

Nous avons vu dans le chapitre 2 que quelque soit le procédé de double impression utilisé, celui-ci consiste à utiliser deux masques d'exposition. Ces derniers sont obtenus à l'issue de l'étape de décomposition permettant de relâcher les pas des motifs sur les deux masques générés. Cependant, tous les outils de décomposition présents sur le marché actuellement, sont basés uniquement sur des considérations géométriques, à savoir le pas ou l'espacement critique. Or, nous avons vu dans le chapitre 1 que la formation de l'image d'un réseau au niveau de la plaquette dépend de la position des premiers ordres de diffraction de ce réseau dans le plan de la pupille. Nous avons développé une nouvelle méthode de décomposition dite « décomposition optique » tenant compte à la fois des considérations géométriques et optiques. La décomposition optique est basée sur l'analyse de la figure de diffraction d'un réseau donné dans le but de déterminer les pas et les orientations du réseau qui vont être limités d'un point de vue optique. Nous nous proposons dans ce chapitre d'introduire le cadre théorique de la décomposition optique. Après avoir discuté les notions permettant de comprendre le principe de la décomposition optique, nous présenterons des résultats de simulation sur lesquels nous nous baserons pour expliquer les différentes étapes de cette nouvelle méthode de décomposition. Les résultats présentés ici ont été obtenus par le biais d'une méthode de calcul que nous avons développé et que nous présenterons à la fin de ce chapitre.

## 3.1 Interaction des ondes planes monochromatiques

### 3.1.1. Interaction de deux ondes

Considérons deux ondes planes monochromatiques (1 et 2) comme montré sur la Figure 3.1. Les deux ondes sont représentées par les vecteurs d'ondes  $\vec{k}_1$  et  $\vec{k}_2$  et leurs projections respectives sur les axes x et z sont  $k_{1x}$ ,  $k_{1z}$ ,  $k_{2x}$  et  $k_{2z}$ . Nous considérons ici que les normes de ces deux vecteurs d'onde sont égales. Les deux ondes (1 et 2) peuvent être écrites dans l'espace (nous nous limitons ici à l'espace en deux dimensions (x et z)) par les équations 3- 1 et 3- 2 respectivement.

$$\vec{E}_1(\vec{r}, t) = E_{01} e^{i(\omega \cdot t - \vec{k}_1 \cdot \vec{r})} \quad 3-1$$

$$\vec{E}_2(\vec{r}, t) = E_{02} e^{i(\omega \cdot t - \vec{k}_2 \cdot \vec{r})} \quad 3-2$$

Avec

$E_{01}$  et  $E_{02}$  : les amplitudes respectives des ondes planes 1 et 2.

$\vec{k}_1$  et  $\vec{k}_2$  : les vecteurs d'onde, respectifs des deux ondes planes 1 et 2.

$\vec{r}$  : le vecteur position des deux ondes dans l'espace (x, z).

(t) : le temps et ( $\omega$ ) : la pulsation des deux ondes qui vaut  $\frac{2\pi \cdot c}{\lambda}$  où c est la vitesse de la lumière dans le vide et  $\lambda$  la longueur d'onde.

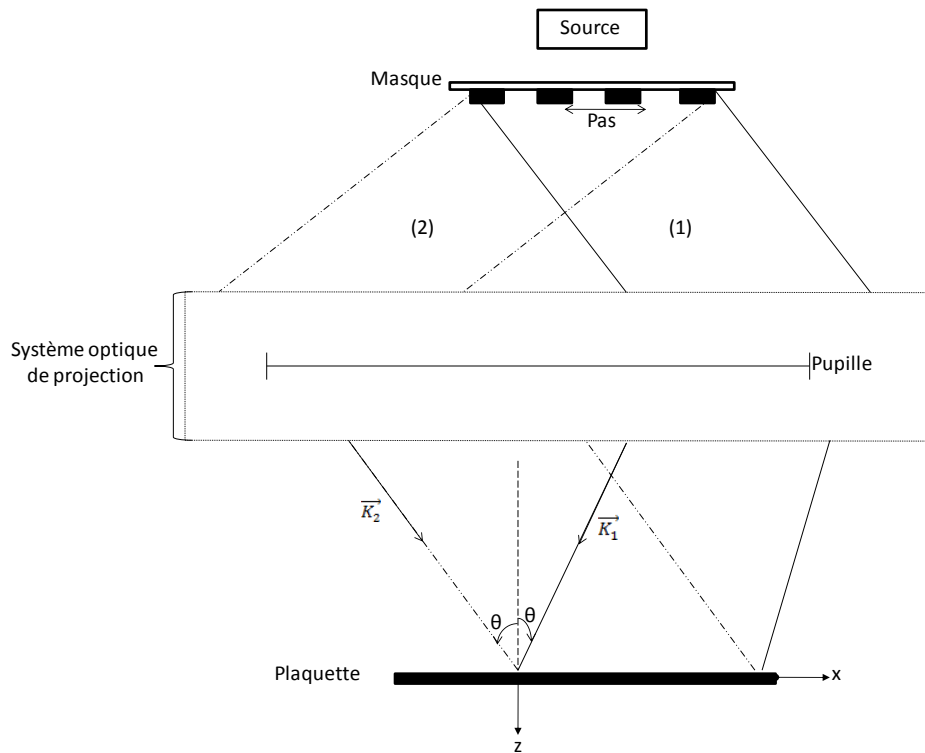


Figure 3.1 : Représentation schématique de deux ondes planes dans un système lithographique

Dans le cas où les deux ondes planes (1 et 2) ne sont pas issues d'un même point source, ces deux ondes ne sont pas cohérentes entre elles. Par conséquent, les interférences entre ces deux ondes sont complètement destructives et le champ total  $\vec{E}$  formé au niveau de la plaquette ne présente pas de modulation. Dans ce cas, il n'y a pas de formation d'image.

Dans le cas où les deux ondes sont issues d'un même point source, les deux ondes sont cohérentes entre elles et vont donc interférer d'une manière constructive au niveau de la plaquette. Ainsi, le champ total formé au niveau de la plaquette est donné par l'équation 3-3.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad \text{3- 3}$$

L'intensité I de l'image formée au niveau de la plaquette est calculée par l'équation 3-4.

$$I = |\vec{E}_1 + \vec{E}_2|^2 \quad \text{3- 4}$$

En projetant les différentes composantes sur les axes x et z, l'intensité I générée par l'interaction des deux ondes planes de la Figure 3.1 est donnée par l'expression 3-5. Elle est fonction de x, z et des composantes des vecteurs d'ondes  $\vec{k}_1$  et  $\vec{k}_2$ .

$$I = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2 \cdot E_{01} \cdot E_{02} \cdot \cos[(k_{1x} + k_{2x})x + (k_{2z} - k_{1z})z] \quad \text{3- 5}$$

Avec :

$$k_{1x} = \frac{2\pi}{\lambda} \sin(\theta_{1x}) \quad \text{et} \quad k_{1z} = \frac{2\pi}{\lambda} \cos(\theta_{1z}) \quad \text{3- 6}$$

$$k_{2x} = \frac{2\pi}{\lambda} \sin(\theta_{2x}) \quad \text{et} \quad k_{2z} = \frac{2\pi}{\lambda} \cos(\theta_{2z}) \quad \text{3- 7}$$

Où  $\theta_{1x}$ ,  $\theta_{1z}$ ,  $\theta_{2x}$  et  $\theta_{2z}$  sont respectivement les projections des angles  $\theta_1$  et  $\theta_2$  dans le plan (x, z).  $\theta_1$  et  $\theta_2$  sont les demi-angles maximales des cônes de lumière formés au niveau de la plaquette par les ondes 1 et 2 respectivement comme il est schématisé en Figure 3.1.

Lorsque les deux ondes (1 et 2) sont symétriques par rapport à l'axe z, les angles  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ . Autrement dit,  $\vec{k}_{1x} = -\vec{k}_{2x}$  et  $\vec{k}_{1z} = \vec{k}_{2z}$ . Dans ce cas, l'expression de l'intensité I se déduit de l'expression 3-5 et devient une variation sinusoïdale en fonction de x seulement et indépendante de la position longitudinale z comme il est donné par l'expression 3-8.

$$I = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2 \cdot E_{01} \cdot E_{02} \cdot \cos[2 \cdot k_{1x} \cdot x] \quad \text{3- 8}$$

En n'importe quelle position longitudinale (z), l'image aérienne aura la même forme sinusoïdale qui varie entre les intensités maximale et minimale données par les équations 3-9 et 3-10 respectivement.



$$I_{\max} = E_1^2 + E_2^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \quad \text{3- 9}$$

$$I_{\min} = E_1^2 + E_2^2 - 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \quad \text{3- 10}$$

En lithographie, un masque illuminé par une onde plane va générer des ordres de diffraction pouvant être considérés comme des ondes planes monochromatiques (90). Les motifs du masque sont reproduits sur la plaquette par un processus d'interférence des ordres de diffraction.

Dans ce cas, la démonstration précédente peut aussi être appliquée à ces ordres de diffraction. La distribution des ordres de diffraction d'un réseau (cf.chapitre 1) est donnée par l'expression 3-11.

$$\sin(\theta_m) = m \cdot \frac{\lambda}{P} \quad \text{Avec } m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad \text{3- 11}$$

La symétrie entre les deux premiers ordres de diffraction se traduit par le fait qu'ils soient à  $\pm \lambda / P$  de l'axe optique, axe z, comme montré en Figure 3.2. C'est cette symétrie qui rend l'image aérienne formée au niveau de la plaquette indépendante de la position longitudinale z et l'intensité de l'image formée est donnée par l'expression 3-8. A l'inverse, la dissymétrie des deux premiers ordres dégrade la qualité de l'image aérienne.

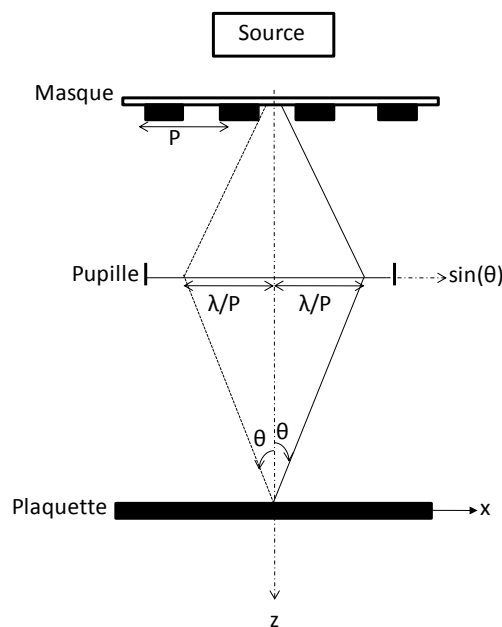


Figure 3. 2 Illustration montrant la symétrie parfaite par rapport à l'axe optique entre les deux premiers ordres de diffraction interagissant ensemble au niveau de la plaquette est de  $\lambda/P$ .

### 3.1.2. Interaction de n ondes

L'approche décrite dans la section précédente peut être généralisée dans le cas où on considère n ondes planes monochromatiques. Chaque onde est représentée par un champ  $\vec{E}_n$  donné par l'équation 3-12.

$$\vec{E}_n(\vec{r}, t) = E_{0n} e^{i(\omega \cdot t - \vec{k}_n \cdot \vec{r})} \quad 3-12$$

Où :

$E_{0n}$ : l'amplitude de l'onde plane.

$\vec{k}_n$  : le vecteur d'onde de l'onde plane.

$\vec{r}$  : le vecteur position des deux ondes dans l'espace (x, z).

(t) : le temps et ( $\omega$ ) : la pulsation des deux ondes qui vaut  $\frac{2\pi \cdot c}{\lambda}$  où c est la vitesse de la lumière dans le vide et  $\lambda$  la longueur d'onde.

Lorsque les n ondes interagissent au niveau de la plaquette, le champ total formé au niveau de la plaquette se calcule selon l'équation 3-13.

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \quad 3-13$$

Ainsi, l'intensité de l'image formée au niveau de la plaquette par les interférences des n ondes se calcule par l'équation 3-14.

$$I_n = |\sum_{i=1}^n E_i|^2 \quad 3-14$$

Considérons par exemple le cas des interactions à 3 ondes. L'intensité de l'image aérienne formée est donnée par l'équation 3-15 où I est l'intensité résultante des interactions à 2 ondes donnée par l'équation 3-8.

$$I_3 = I + E_3^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_3 \cdot \cos(\vec{E}_1, \vec{E}_3) + 2 \cdot E_2 \cdot E_3 \cdot \cos(\vec{E}_2, \vec{E}_3) \quad 3-15$$

Nous proposons dans les sections suivantes d'analyser les interactions des ordres de diffraction dans le plan de la pupille pour le cas des illuminations partiellement cohérentes (cf. chapitre 1). Nous nous intéresserons dans un premier temps à la figure de diffraction d'un réseau de lignes puis nous verrons par la suite l'évolution de la figure de diffraction pour un réseau de contacts.

## 3.2 Analyse de la figure de diffraction pour un réseau de lignes

Les sources partiellement cohérentes : conventionnelle, annulaire, quadripolaire,... (cf. chapitre 1) peuvent être décrites comme étant la somme de plusieurs ondes planes (91). La formation d'image en utilisant ce type de sources est basée sur la capture des premiers ordres de diffraction ( $\pm 1$ ) dans le plan de la pupille. Dans cette partie, nous considérons un réseau de lignes parallèles et infinies selon  $y$ , de pas  $P$  selon  $x$ , illuminées avec une longueur d'onde  $\lambda$  d'une source conventionnelle de facteur de cohérence  $\sigma$  (voir Figure 3.3). Notons que dans ce manuscrit, nous nous limitons à l'étude de l'interaction des trois premiers ordres de diffraction ( $-1$ ,  $0$  et  $+1$ ) responsables de la formation de l'image pour les pas de réseau agressifs.

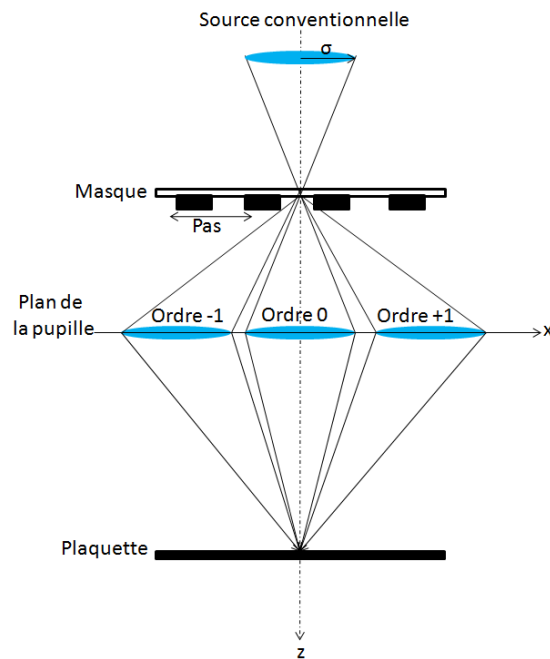


Figure 3.3. Représentation schématique d'un réseau de lignes infinies selon  $y$  et périodique selon  $x$  illuminées avec une source conventionnelle dans un système lithographique

### 3.2.1. Evolution des interactions entre les ordres de diffraction

Il est possible de prédire, en fonction du pas du réseau, de la longueur d'onde, de l'ouverture numérique et du facteur de cohérence de la source, s'il y a formation d'image ou pas et de prédire également le type d'interaction à l'origine de la formation d'image.

Comme nous avons vu au chapitre 1, l'ordre 0 de diffraction d'un réseau de ligne se trouve au centre de la pupille et les centres des premiers ordres de diffraction sont à une distance de  $\lambda/P$  du centre de l'ordre 0.

### 3.2.1.1. Pas d'interaction

Lorsque  $\lambda/P > NA(1 + \sigma)$  comme il est montré en Figure 3.4.a, les deux premiers ordres de diffraction sont complètement filtrés par la pupille. Dans ce cas, il n'y a pas de formation de l'image du réseau de lignes au niveau de la plaquette. Autrement dit, il n'y a pas de modulation de l'intensité en fonction de la position dans le plan image comme il est montré en Figure 3.4.b. Dans ce cas, l'intensité continue (fond continu) montrée en Figure 3.4.b symbolise l'ordre 0 qui ne participe pas aux interférences.

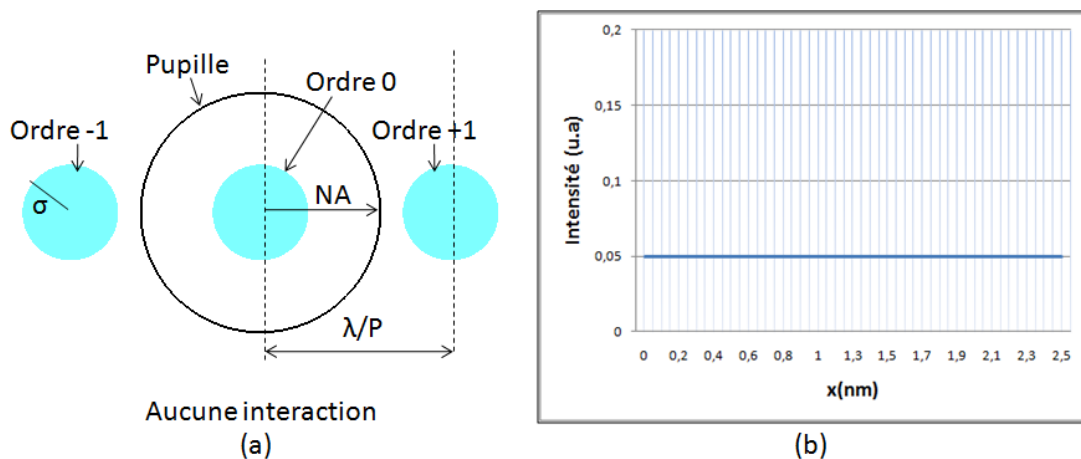


Figure 3.4. a) Figure de diffraction dans le cas non résolu, b) Intensité correspondante au niveau de l'image aérienne.

### 3.2.1.2. Introduction des interférences à deux ordres

Lorsque  $NA < \lambda/P < NA(1 + \sigma)$ , les premiers ordres de diffraction sont partiellement captés par la pupille, comme il est montré en Figure 3.5.a. Les surfaces des ordres +1 et -1 captées par la pupille sont entourées de couleur rouge et bleu respectivement sur la Figure 3.5.a. Chaque point de la surface de l'ordre +1 (-1) capté par la pupille interfère constructivement avec un autre point de l'ordre 0 tel que la distance entre ces deux points dans le plan de la pupille est égale à  $\lambda/P$ . La surface de l'ordre 0 ne participant pas aux interférences est symbolisée par des hachures horizontales sur la Figure 3.5.a. Dans ce cas, les interférences à deux ordres (entre les ordres -1 et 0 et entre les ordres 0 et +1) sont à l'origine de la modulation de l'intensité lumineuse de l'image formée.

La Figure 3.5.b montre cette modulation de l'intensité de l'image du réseau de lignes formée au niveau de la plaquette.

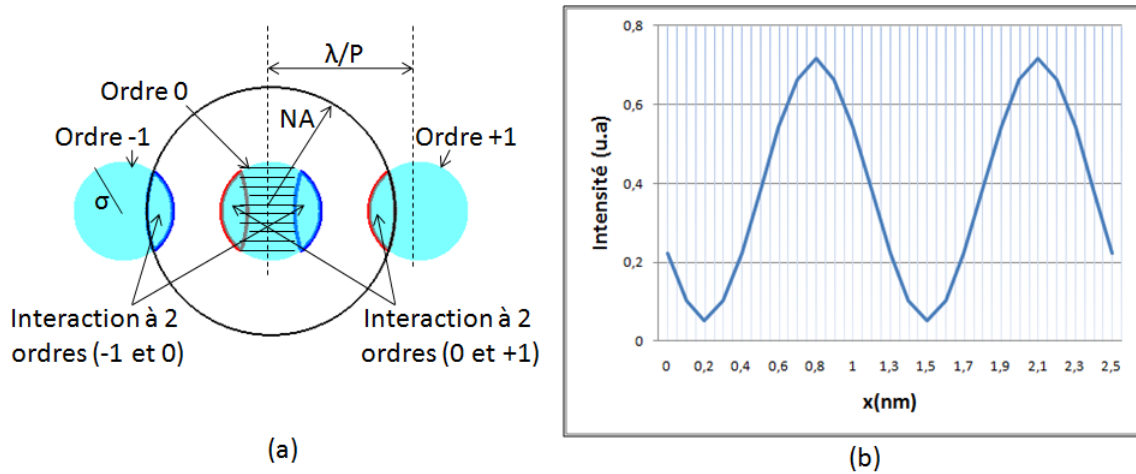


Figure 3.5. a) Interactions à deux ordres entre les premiers ordres de diffraction captés par la pupille, b) formation d'image dans ce cas.

### 3.2.1.3. Introduction des interférences à trois ordres

Lorsque  $NA \cdot \sqrt{1 - \sigma^2} < \lambda/P < NA$ , il existe deux types d'interactions (voir Figure 3.6.a): les interactions à deux ordres (0/+1 ou 0/-1) et les interactions à trois ordres (-1/0/+1). Dans ce cas, tous les points de la surface de l'ordre 0 participent aux interférences. La surface de l'ordre 0 participant aux interactions à trois ordres seulement est schématisée sur la Figure 3.6.a par des croix.

Lorsque  $\lambda/P < NA (1 - \sigma)$ , les deux premiers ordres de diffraction sont complètement capturés par la pupille (voir Figure 3.6.b). Dans ce cas, toutes les interactions entre les ordres de diffraction sont des interactions à trois ordres (-1/0/+1).

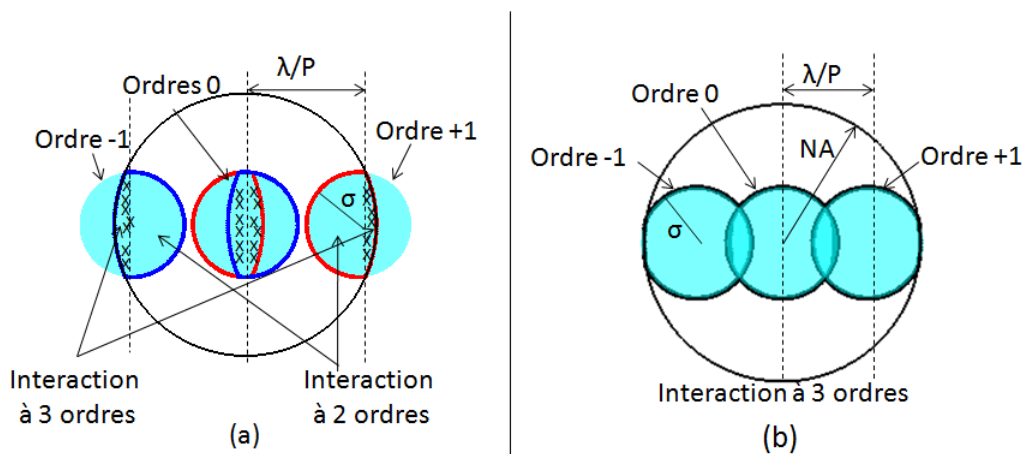


Figure 3.6. Figure de diffraction pour un réseau de lignes illuminée avec une source conventionnelle, a) interaction à 2 ordres et à 3 ordres, b) interaction à 3 ordres seulement.

Les expressions donnant les types d'interaction entre les ordres de diffraction en fonction du pas, de la longueur d'onde, de l'ouverture numérique pour une source annulaire et quadripolaire sont données en annexe 1. Il a été établi (89) que l'allure de l'intensité de l'image formée au niveau de la plaquette, ou encore la qualité de l'image aérienne en termes de contraste, dépend des interférences mises en jeu pour la formation de l'image. En d'autres termes, la qualité de l'image aérienne dépend des surfaces d'interaction des ordres de diffraction avec le plan de la pupille. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux calculs des surfaces d'interaction à deux ordres responsables de la formation de l'image des réseau de pas petits.

### 3.2.2. La surface de recouvrement

Pour une source et un pas de réseau donné, nous avons calculé les surfaces de recouvrement des premiers ordres de diffraction avec la pupille donnant naissance à des interférences à deux ordres. Ce calcul a été fait dans le but de pouvoir évaluer la qualité de l'image formée comme nous le verrons par la suite. La Figure 3.7 montre une figure de diffraction obtenue pour un réseau de lignes de pas  $P$  illuminé avec une source conventionnelle. Le pas du réseau a été choisi de sorte que les interactions entre les premiers ordres de diffraction sont des interactions à deux ordres. Sur la Figure 3.7, les surfaces de recouvrement des ordres  $+1$  et  $-1$  avec la pupille sont notées respectivement  $S_{+1}$  (en couleur rouge) et  $S_{-1}$  (en couleur bleu). La surface de recouvrement des premiers ordres de diffraction avec la pupille impliquant des interférences à deux ordres est calculée à partir de l'équation 3-16. Notons ce que la surface de recouvrement  $S$  donnée par l'équation 3-16 n'est pas une surface car nous avons fait le choix de normaliser les surfaces de recouvrement des premiers ordres de diffraction avec la pupille par rapport à la surface de la source (surface de l'ordre 0).

$$S = \frac{S_{+1} + S_{-1}}{S_0} \cdot 100\% \quad \text{3- 16}$$

Avec

$S_0$  est la surface de l'ordre 0 (de la source)

$S_{+1}$  est la surface de l'ordre de diffraction (+1)

$S_{-1}$  est la surface de l'ordre de diffraction (-1)

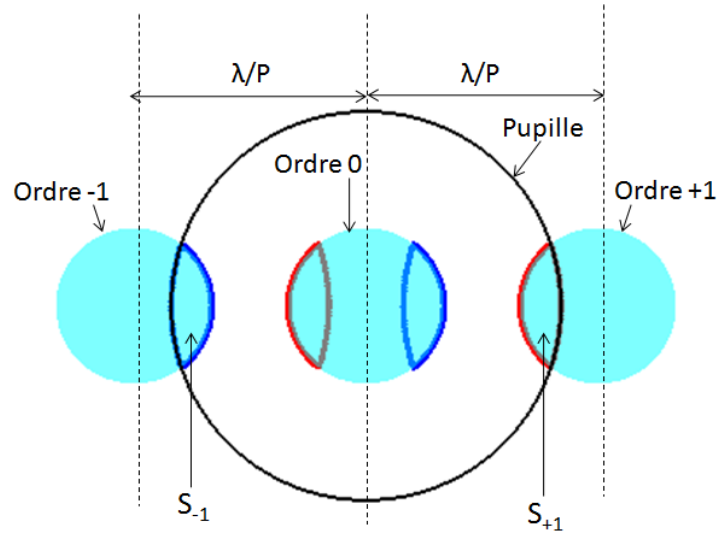


Figure 3.7. Schéma illustrant les surfaces de recouvrement des ordres de diffraction avec la pupille ( $S_{+1}$  et  $S_{-1}$ ) pour une illumination conventionnelle ( $\lambda=193\text{nm}$ ,  $\text{NA}=1.35$ ,  $\sigma = 0.6$ ) et un pas de réseau de  $120\text{nm}$ .

La surface de recouvrement est liée à l'intensité lumineuse de l'image formée au niveau de la plaquette et peut s'écrire, dans le cas où on ne considère que 3 ordres, par l'expression donnée par l'équation 3-17 (92) :

$$I(x) = S_0 \cdot C_0^2 + S \cdot (C_0^2 + C_1^2 + 2C_1C_0 \cos(2\pi x)) + S_3 \cdot (C_0 + 2C_1 \cos(2\pi x))^2 \quad \mathbf{3-17}$$

Avec

$S_0$  surface de l'ordre 0 ne participant pas aux interférences.

$S$  surface de recouvrement des premiers ordres de diffraction participant aux interférences à deux ordres.

$S_3$  surface de recouvrement des premiers ordres de diffraction participant aux interférences à trois ordres.

$C_0$  et  $C_1$  sont des constantes tenant compte de la longueur d'onde, du pas de réseau et des facteurs de transmission du masque.

Ainsi, le contraste (cf. chapitre 1) peut s'écrire par l'expression donnée en 3-18.

$$C = \frac{2C_0C_1 \cdot (2S_3 + S)}{S_0 \cdot C_0^2 + S \cdot (C_0^2 + C_1^2) + S_3 \cdot (C_0^2 + 4C_1^2)} \cdot 100\% \quad \mathbf{3-18}$$

Par conséquent, la surface de recouvrement et le contraste sont deux métriques liées entre elles. Considérons le cas d'interférences à deux ordres seulement. Le contraste dans ce cas se calcule par l'expression décrite en 3-19.

$$C = \frac{2C_0C_1.S}{S_0.C_0^2+S.(C_0^2+C_1^2)} \cdot 100\% \quad \text{3- 19}$$

Lorsqu'aucun des premiers ordres de diffraction n'est capté par la pupille, la surface de recouvrement des ordres de diffraction est nulle impliquant un contraste nul d'après l'équation 3-19. Plus il y a d'ordres de diffraction captés par la pupille, plus la surface de recouvrement est grande et donc plus le contraste l'est aussi.

Dans les travaux de cette thèse, nous avons décidé d'utiliser la surface de recouvrement pour évaluer la qualité d'impression d'un réseau de motifs. Avant de se lancer dans des simulations complexes et surtout coûteuses en termes de temps pour évaluer l'impression d'un motif donné, généralement des simulations d'OPC suivies de simulations des contours d'impression des motifs (cf. chapitre 1 section 1.5.3.2), il est préférable de faire une analyse des figures de diffraction. En effet, celle-ci nous permet d'avoir, assez rapidement, une idée sur la qualité des motifs imprimés. L'analyse de la figure de diffraction se fait pour une source donnée, un pas de réseau donné, une longueur d'onde et une ouverture numérique donnée. En changeant un de ces paramètres, la figure de diffraction et donc les surfaces de recouvrements vont changer nécessairement.

### **3.2.3. Evolution de la surface de recouvrement en fonction du pas du réseau**

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à l'évolution de la surface de recouvrement pour un réseau de lignes parallèles de pas  $P$  illuminé avec une illumination quadripolaire (constituée de quatre pôles : deux pôles en  $x$  et deux pôles en  $y$ ), montrée en Figure 3.8, dont les facteurs de cohérence  $\sigma_{\min}$  et  $\sigma_{\max}$  sont respectivement 0.7 et 0.9 et l'ouverture de chaque pôle PO (de l'anglais *Pole Opening*) est de  $35^\circ$ . Nous avons utilisé  $\lambda=193\text{nm}$  et  $\text{NA}=1.35$ . Nous avons fait le choix d'utiliser la source montrée en Figure 3.8 car celle-ci est proche de celles qui pourraient être utilisées pour l'impression des motifs critiques du nœud 22nm.



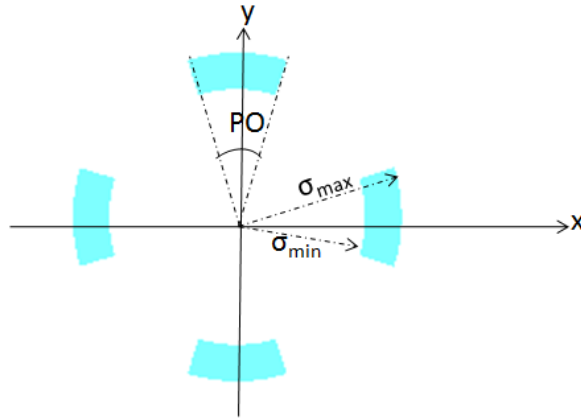


Figure 3.8. Source quadripolaire utilisée. L'ouverture angulaire de chacun de ses pôles  $PO=35^\circ$  et sa cohérence  $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.7/0.9$

Pour chaque pas de réseau, nous avons calculé la surface de recouvrement que nous avons reportée sur la Figure 3.9 (courbe de couleur bleu) et le contraste de l'image aérienne formée que nous avons aussi reporté sur la même figure (courbe de couleur rouge).

D'après la Figure 3.9, la surface de recouvrement pour un pas de réseau de 80nm est nulle. En effet, pour ce pas de réseau, les premiers ordres de diffraction sont complètement filtrés par la pupille comme il est montré sur la Figure 3.10.a. Plus le pas de réseau est important, plus la surface de recouvrement des premiers ordres de diffraction avec la pupille est grande.

La figure de diffraction obtenue pour un pas de réseau de 100nm est montrée en Figure 3.10.b. Dans ce cas, un pôle de chaque ordre de diffraction (il s'agit des pôles selon l'axe x) est complètement capté par la pupille, ce qui implique que deux pôles sur quatre de l'ordre 0 participent aux interférences à deux ordres. Ainsi, sur la Figure 3.9, la surface de recouvrement pour le pas de 100nm est égale à 0.5.

Pour les pas entre 100nm et 140nm, la surface de recouvrement ne change pas et reste égale à celle du pas 100nm, c'est-à-dire à 0.5 (voir Figure 3.9). Cela ne veut pas dire que la figure de diffraction ne change pas pour ces pas de réseau. Bien au contraire, les premiers ordres de diffraction se resserrent autour du centre de la pupille d'autant que le pas du réseau est plus important. Seulement, dans ce cas, étant donné le facteur de cohérence et l'ouverture de chaque pôle de la source ainsi que les pas de réseau entre 100nm et 140nm, seulement deux pôles (les pôles selon l'axe x) de l'ordre 0 participent aux interférences.

Pour un pas de 150nm, les pôles selon l'axe y de chacun des premiers ordres de diffraction commencent à être capturés par la pupille comme il est illustré sur la Figure 3.10.c. Ainsi, la surface de recouvrement devient supérieure à 0.5. Ce qui veut dire que plus de la moitié de la surface de l'ordre 0 participe à la formation d'image.

La surface de recouvrement augmente ainsi jusqu'au pas de 180nm pour lequel elle est égale à 1. Pour ce pas là, les interférences à trois ordres commencent à apparaître et toute la surface de l'ordre 0 participe aux interférences (voir Figure 3.10.d). Rappelons que dans notre étude, on ne s'intéresse qu'aux interférences à deux ordres à l'origine de la formation d'image des réseaux dont les pas sont agressifs.

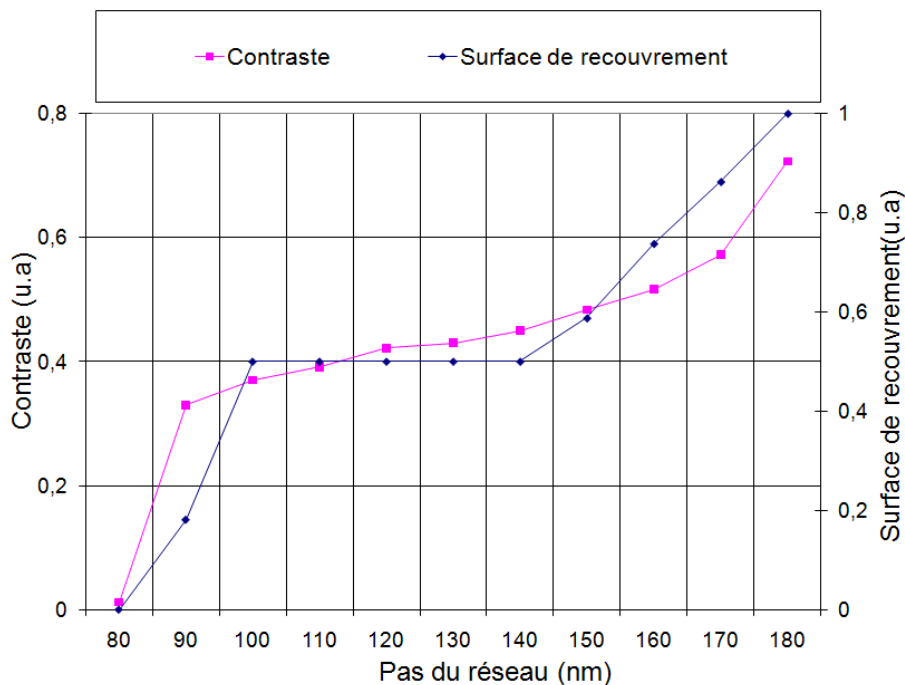


Figure 3.9. Variation en fonction du pas du réseau de la surface de recouvrement (courbe en bleu) et du contraste de l'image formée (courbe en rouge)

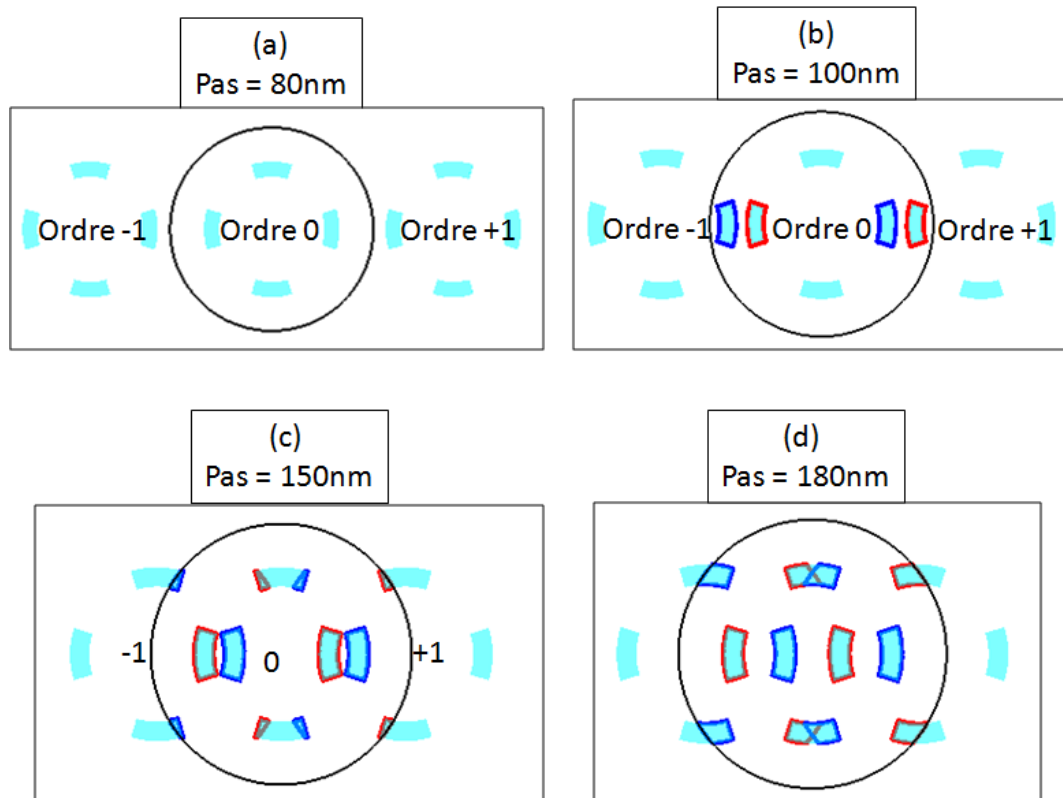


Figure 3.10. Variation de la figure de diffraction en fonction du pas de réseau, a) pas=80nm, b) pas=100nm, c) pas=150nm et d) pas=180nm

D'autre part, en comparant l'allure des courbes montrées sur la Figure 3.9, nous remarquons que ces deux courbes ont la même allure. Plus le pas de réseau est grand, plus la surface de recouvrement est importante impliquant ainsi une image formée qui sera plus contrastée. A l'inverse, l'image aérienne des motifs dont le pas est agressif (si elle existe) ne sera pas très contrastée.

L'analyse de la figure de diffraction en fonction du pas de réseau nous permet de déterminer les pas du réseau pour lesquels il n'y aura pas de formation d'image. De plus, dans le cadre de cette étude utilisant une source quadripolaire, nous pouvons conclure que l'utilisation d'une source dipolaire (2 pôles selon l'axe de périodicité du réseau : axe x) permettrait de diminuer la surface de l'ordre 0 ne participant pas à la formation de l'image et donc d'augmenter la surface de recouvrement. Ainsi, d'après l'équation 3-19, le contraste de l'image formée au niveau de la plaquette avec une source dipolaire sera meilleur que celui obtenu en utilisant une source quadripolaire.

Généralement, le contraste des motifs à imprimer est simulé sur tout le masque et peut prendre un temps non négligeable étant donné la complexité des motifs à imprimer et la taille du masque. L'analyse de la figure de diffraction ou le calcul de la surface de recouvrement nous permet d'avoir une idée sur le contraste de l'image aérienne, c'est-à-dire la qualité d'impression des motifs, indépendamment du masque. En effet, cette méthode est basée sur l'analyse des structures denses et périodiques présentes sur le masque. Elle nous permet ainsi de gagner du temps et d'avoir, assez rapidement, une idée sur le contraste des motifs imprimés. Nous proposons dans la section suivante, d'appliquer cette méthode à un réseau de contacts.

### 3.3 Figure de diffraction pour un réseau de contacts

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à l'étude de la figure de diffraction d'un réseau de contacts, défini par deux pas :  $\text{pas}_x$  selon l'axe x et  $\text{pas}_y$  selon l'axe y. Considérons le cas général illustré sur la Figure 3.11.a où  $\text{pas}_x > \text{pas}_y$ .

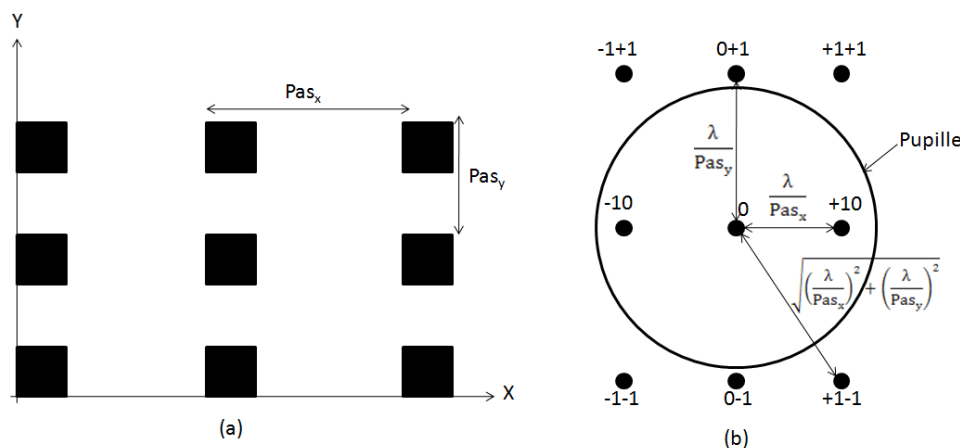


Figure 3.11. a) Réseau de contacts défini par deux pas  $\text{pas}_x$  et  $\text{pas}_y$  tel que  $\text{pas}_x > \text{pas}_y$ , b) Figure de diffraction correspondante obtenue avec une illumination cohérente.

Lorsque ce réseau est illuminé avec une source cohérente, la figure de diffraction obtenue est montrée en Figure 3.11.b. Les huit premiers ordres de diffraction sont disposés autour de l'ordre 0 qui est au centre de la pupille :

- Les ordres (+10) et (-10) selon l'axe x.
- Les ordres (0+1) et (0-1) selon l'axe y.
- Les ordres (+1+1), (-1-1), (-1+1) et (+1-1) selon les deux diagonales.

Les ordres de diffraction (+10) et (-10) sont à une distance de  $\lambda/Pas_x$  par rapport à l'ordre 0. Tandis que les ordres (0+1) et (0-1) sont à une distance de  $\lambda/Pas_y$  par rapport à l'ordre 0. Les ordres de diffraction selon les deux diagonales sont tous séparés de  $\sqrt{\left(\frac{\lambda}{Pas_x}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{Pas_y}\right)^2}$  de l'ordre 0.

Pour que l'image du réseau de contacts soit formée, il faut qu'il y ait au moins une interférence constructive à deux ordres. C'est-à-dire, il faut qu'au moins un des huit premiers ordres de diffraction soit capté par la pupille. Dans le cas montré sur la Figure 3.11.b,  $\lambda/Pas_x < NA$ , ainsi les ordres (+10) et (-10) sont complètement captés par la pupille et donc vont interférer en formant une image du réseau. Les ordres selon l'axe y et selon les deux diagonales sont complètement filtrés par la pupille. Ainsi, ils ne vont pas contribuer à la formation de l'image du réseau de contacts.

Dans le cas où ce réseau est illuminé avec une source partiellement cohérente, la capture des premiers ordres de diffraction par la pupille dépend des pas du réseau, de la longueur d'onde, de l'ouverture numérique mais aussi des facteurs de cohérence de la source. Considérons un réseau de contacts régulier montré en Figure 3.12.a où  $pas_x = pas_y = pas$ , une longueur d'onde  $\lambda=193nm$  et l'ouverture numérique de la pupille  $NA=1.35$ . Lorsque ce réseau est illuminé avec une source quadripolaire dont les facteurs de cohérence  $\sigma_{min}$  et  $\sigma_{max}$  sont respectivement 0.6 et 0.8 et l'ouverture de chaque pôle PO est de  $20^\circ$ , la figure de diffraction obtenue dépend essentiellement du pas du réseau.

La figure de diffraction obtenue pour un pas de réseau de  $pas = 95nm$  est montrée en Figure 3.12.b. Les ordres de diffraction selon les deux diagonales : (+1+1), (-1-1), (-1+1) et (+1-1) sont tous filtrés par la pupille. Les surfaces de recouvrement des ordres de diffraction (+1+1), (-1-1), (-1+1) et (+1-1) avec la pupille sont respectivement  $S_{+1+1}$ ,  $S_{-1-1}$ ,  $S_{-1+1}$  et  $S_{+1-1}$  et sont, dans ce cas, nulles. Par conséquent, ils ne vont pas contribuer à la formation de l'image du réseau.

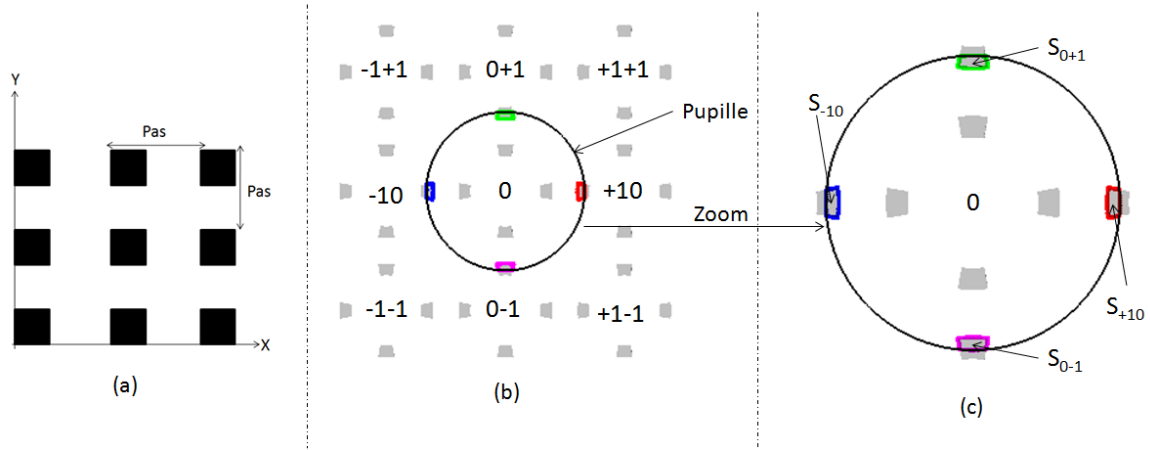


Figure 3.12. a) réseau de contacts régulier de pas P, b) Figure de diffraction correspondante obtenue avec une illumination quadripolaire ( $\lambda=193\text{nm}$ ,  $\text{NA}=1.35$ ,  $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.6/0.8$ ,  $\text{PO}=20^\circ$ ) et un pas de réseau de  $95\text{nm}$ , c) Zoom de la pupille de diffraction montrant les surfaces de recouvrement des ordres captés par la pupille.

Les ordres de diffraction selon l'axe x et l'axe y sont captés partiellement par la pupille. Nous pouvons voir dans le zoom montré en Figure 3.12.c ce qui se passe exactement au niveau de la pupille. Chaque ordre de diffraction (selon l'axe x ou y) voit une partie d'un de ses pôles captée par la pupille. Par exemple, la partie du pôle (+10) captée par la pupille est entourée de couleur rouge. Cette partie est appelée ( $S_{+10}$ ) surface de recouvrement de l'ordre (+10) car elle va interférer d'une manière constructive avec l'ordre 0 afin de former l'image du réseau de contacts.

De la même manière, les surfaces de recouvrement des ordres de diffraction (-10), (0+1) et (0-1) avec la pupille, sont entourées de couleur bleu ( $S_{-10}$ ), vert ( $S_{0+1}$ ) et magenta ( $S_{0-1}$ ) respectivement. Toutes ces surfaces de recouvrement contribuent à la formation d'image grâce au processus d'interférences à deux ordres. Rappelons que dans ce manuscrit, on ne s'intéresse qu'aux interférences à deux ordres. La surface de recouvrement totale des premiers ordres de diffraction avec la pupille est normalisée par rapport à la surface de la source (surface de l'ordre 0) et est donnée par l'équation 3-20.

$$S = \frac{S_{+10} + S_{-10} + S_{0+1} + S_{0-1} + S_{+1+1} + S_{-1-1} + S_{+1-1} + S_{-1+1}}{S_0} \cdot 100\% \quad \mathbf{3-20}$$

Avec

$S_0$  est la surface de l'ordre 0 (de la source)

$S_{\pm i \pm j}$  est la surface de recouvrement de l'ordre de diffraction ( $\pm i \pm j$ ) avec la pupille

### 3.4 Evolution de la surface de recouvrement pour un réseau de contacts

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à évaluer les variations de la surface de recouvrement d'un réseau de contacts en fonction du pas du réseau et aussi de l'orientation du réseau.

#### 3.4.1. Evolution en fonction du pas du réseau

Considérons un réseau de contacts régulier de pas  $P$ , illuminé avec une source quadripolaire dont les facteurs de cohérence  $\sigma_{\min}$  et  $\sigma_{\max}$  sont respectivement 0.6 et 0.8 et l'ouverture de chaque pôle PO est de  $20^\circ$ . La longueur d'onde  $\lambda=193\text{nm}$  et l'ouverture numérique de la pupille  $\text{NA}=1.35$ . Pour chaque pas du réseau, nous avons calculé la surface de recouvrement que nous avons reporté sur la Figure 3.13. La Figure 3.14 schématise la pupille des figures de diffraction correspondant à différentes valeurs de pas.

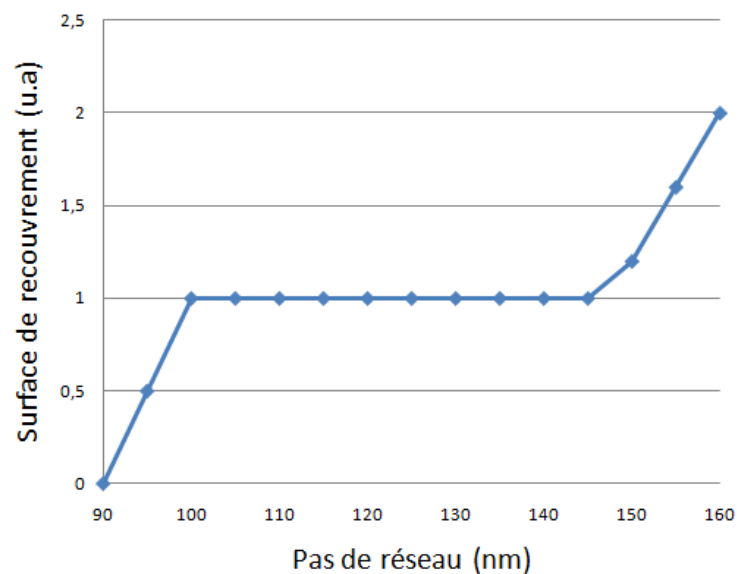


Figure 3.13. Variation de la surface de recouvrement en fonction du pas du réseau

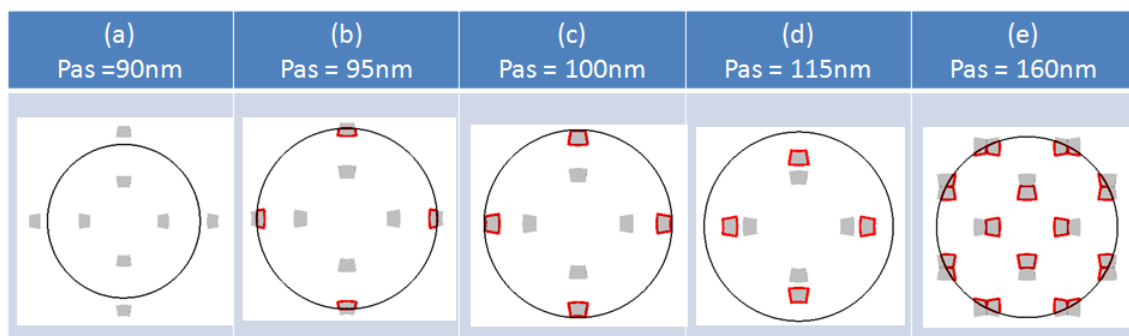


Figure 3.14. Pupille de la figure de diffraction obtenue avec une source quadripolaire ( $\lambda=193\text{nm}$ ,  $\text{NA}=1.35$ ,  $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.6/0.8$ ,  $\text{PO}=20^\circ$ ) pour différentes valeurs de pas : a) 90nm, b) 95nm, c) 100nm, d) 115nm et e) 160nm.

L'évolution de la surface de recouvrement en fonction du pas de réseau, présentée en Figure 3.13, présente essentiellement trois zones :

La première zone concerne les pas vérifiant  $90\text{nm} < \text{pas} < 100\text{nm}$ . La surface de recouvrement pour le pas de 90nm est nulle car pour ce pas, les premiers ordres de diffraction selon les axes x ou y ou encore selon les deux diagonales sont complètement filtrés par la pupille comme le montre la Figure 3.14.a.

Pour le pas de 95nm, les quatre ordres de diffraction selon les deux diagonales sont complètement filtrés par la pupille. Tandis que les quatre autres premiers ordres de diffraction (selon les axes x et y) sont captés partiellement par la pupille (voir Figure 3.14.b). En effet,  $1/8$  de la surface de chacun des quatre ordres selon x ou y est captée par la pupille. C'est pour cette raison que la surface de recouvrement pour le pas de 95nm est égale à 0.5.

Pour le pas de 100nm, les quatre ordres de diffraction selon les deux diagonales restent toujours filtrés par la pupille alors que les quatre autres ordres ont chacun un pôle capté complètement par la pupille (voir Figure 3.14.c). Ce qui veut dire que chacun des quatre ordres de diffraction selon les axes x ou y a un quart de sa surface captée par la pupille. C'est pour cette raison que la surface de recouvrement est égale à 1.

La seconde zone concerne les pas vérifiant  $100\text{nm} < \text{pas} < 145\text{nm}$ . Dans ce palier, la surface de recouvrement ne change pas et reste égale à 1 car pour ces pas de réseau, les quatre ordres de diffraction selon les deux diagonales restent filtrés par la pupille alors que  $1/4$  des quatre autres ordres sont complètement captés par la pupille. La seule évolution dans les figures de diffraction relatives aux pas appartenant à cet intervalle est que plus le pas de réseau augmente, plus les premiers ordres de diffraction se resserrent autour de l'ordre 0. C'est ce qu'on peut constater en comparant la figure de diffraction obtenue pour un pas de 100nm (voir Figure 3.14.c) à celle du pas de 115nm (voir Figure 3.14.d).

La troisième zone concerne les pas de réseau supérieurs à 150nm. Pour ces pas là, les ordres de diffraction selon les deux diagonales commencent à être captés par la pupille augmentant ainsi la surface de recouvrement. Pour le pas de 160nm, la surface de recouvrement est égale à 2, ce qui signifie que la surface des premiers ordres de diffraction participant à la formation d'image pour le pas de réseau de 160nm est deux fois la surface de la source (voir Figure 3.14.e).



En conclusion, la variation de la surface de recouvrement en fonction du pas du réseau de contacts (Figure 3.13) montre qu'en utilisant l'illumination présentée précédemment, les contacts dont le pas est inférieur à 90nm ne seront pas résolus. C'est-à-dire que le pas de 90nm est le pas critique. Cependant, même si la surface de recouvrement montre une possible formation d'image pour les pas supérieurs à 90nm, cela reste dans le cas de réseau régulier. En d'autres termes, il faut tenir compte des différentes orientations du réseau de contacts lors de l'étude de l'évolution de la surface de recouvrement. Ceci constitue l'objectif de la section suivante.

### 3.4.2. Evolution en fonction de l'orientation du réseau

Considérons un réseau de contacts orientés entre eux d'un angle  $\theta$  comme montré sur la Figure 3.15.a. Dans le cas d'une source cohérente, les huit premiers ordres de diffraction d'un tel réseau subissent tous une rotation d'un angle  $\theta$ , définissant le réseau de contacts orienté, autour du centre de la pupille. La Figure 3.15.b schématise cette idée : les points noirs correspondent aux premiers ordres de diffraction pour un réseau de contacts régulier et les points rouges correspondent aux premiers ordres de diffraction pour un réseau de contacts orienté.

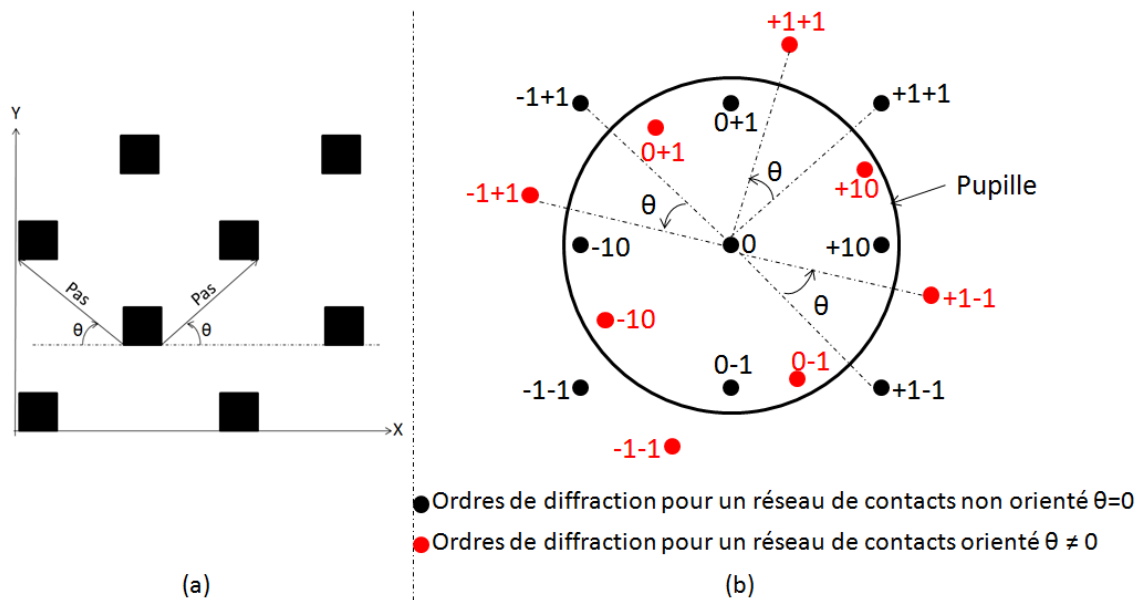


Figure 3.15. a) Réseau de contacts orientés d'un angle  $\theta$ , b) Comparaison de la figure de diffraction obtenue avec une source cohérente dans le cas d'un réseau de contacts régulier (en noir) et dans le cas d'un réseau de contacts orientés d'un angle  $\theta$ .

Dans le cas d'une source partiellement cohérente, la rotation des ordres de diffraction due à l'orientation du réseau de contacts peut impacter la surface de recouvrement calculée.

Considérons la source quadripolaire utilisée dans la section 3.4.1 et un réseau de contacts de pas = 95nm. Les Figures 3.16.a et b montrent les figures de diffraction obtenues dans ces conditions pour un réseau régulier ( $\theta=0^\circ$ ) et pour un réseau orienté de  $\theta=45^\circ$  respectivement.

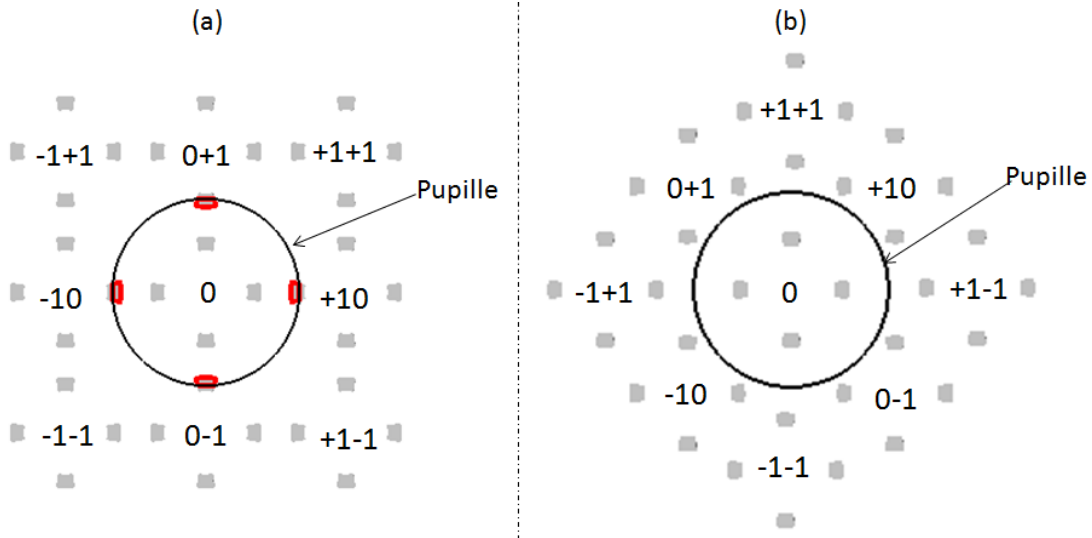


Figure 3.16. Figures de diffraction obtenues avec une source quadripolaire ( $\lambda=193\text{nm}$ ,  $\text{NA}=1.35$ ,  $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.6/0.8$ ,  $\text{PO}=20^\circ$ ) et un pas de réseau de 95nm pour deux orientations  $\theta$  de réseau : a)  $\theta=0^\circ$ , b)  $\theta=45^\circ$ .

Dans le cas d'un réseau régulier, les premiers ordres de diffraction selon les axes x et y sont captés partiellement par la pupille conduisant à une surface de recouvrement qui n'est pas nulle. Les contours de la surface de recouvrement sont de couleur rouge sur la Figure 3.16.a. Pour le même pas de réseau et la même source, si on considère une orientation du réseau de contacts de  $45^\circ$ , on observe sur la Figure 3.16.b que tous les ordres de diffraction subissent une rotation de  $45^\circ$  autour du centre de la pupille. Notons bien qu'il s'agit d'une rotation de tous les ordres de diffraction autour du centre de la pupille et pas une rotation des pôles des ordres de diffraction. Dans ce cas, aucun des premiers ordres de diffraction n'est capté par la pupille, ce qui nous donne une surface de recouvrement nulle. Par conséquent, pour une source donnée, la surface de recouvrement varie en fonction du pas et de l'orientation du réseau.

Pour chaque pas de réseau et pour chaque valeur de l'orientation du réseau, la surface de recouvrement correspondante ainsi que le contraste de l'image aérienne ont été simulés. La Figure 3.17.a montre la variation de la surface de recouvrement ainsi que celle du contraste en fonction de l'orientation du réseau de contacts de pas de 100nm.

Les valeurs du contraste ainsi que de la surface de recouvrement ont été normalisés par rapport à leurs valeurs maximales respectives. La variation de la surface de recouvrement en fonction de l'orientation du réseau est périodique de période  $90^\circ$ . C'est pour cette raison que nous avons reporté sur la Figure 3.17.a les variations entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$  seulement. La Figure 3.17.b montre les pupilles des figures de diffraction pour les orientations du réseau :  $0^\circ$  et  $25^\circ$ .

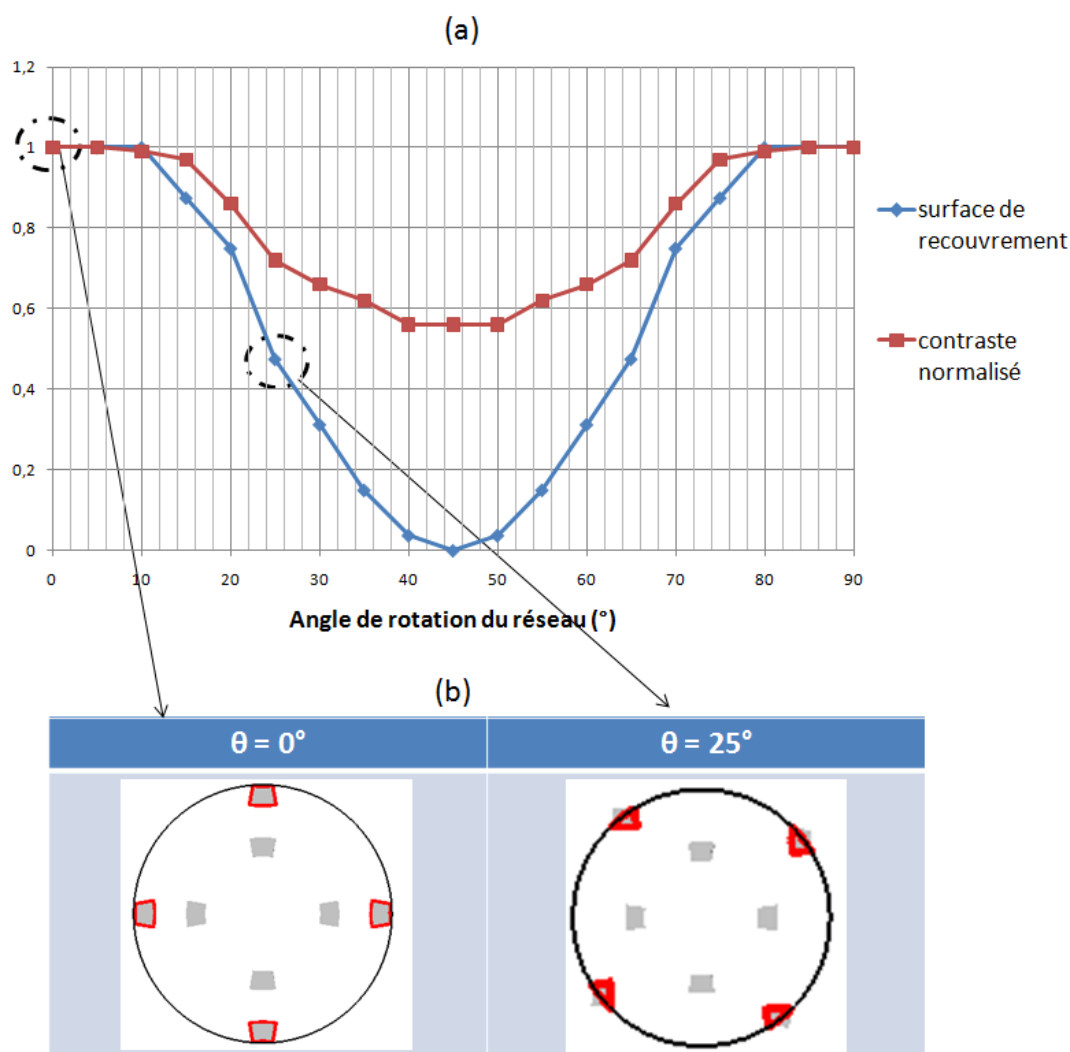


Figure 3.17. a) Variation de la surface de recouvrement d'un réseau de contacts de pas 100nm illuminé avec une source quadripolaire ( $\lambda=193\text{nm}$ ,  $\text{NA}=1.35$ ,  $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.6/0.8$ ,  $\text{PO}=20^\circ$ , b) Pupilles des figures de diffraction dans ce cas pour les orientations du réseau de contacts  $\theta = 0^\circ$  et  $25^\circ$

Dans le cas d'un réseau régulier ( $\theta=0^\circ$ ), les ordres de diffraction selon les deux diagonales sont complètement filtrés par la pupille alors que  $1/4$  des quatre autres ordres sont complètement captés par la pupille (voir Figure 3.17.b, cas  $\theta=0^\circ$ ). C'est pour cette raison que la surface de recouvrement dans ce cas vaut 1.

Pour les orientations  $\theta$  du réseau de contacts vérifiant  $0^\circ < \theta < 10^\circ$ , la surface de recouvrement reste maximale et vaut 1. Pour les orientations vérifiant  $10^\circ < \theta < 50^\circ$ , les surfaces de recouvrement correspondantes diminuent. Ceci est dû au fait que pour ces orientations, les premiers ordres de diffraction sont moins captés par la pupille. En effet, la Figure 3.17.b pour le cas de  $\theta=25^\circ$  montre la figure de diffraction dans ce cas, pour laquelle la surface de recouvrement est faible comparé au cas  $\theta=0^\circ$ .

Pour les orientations vérifiant  $50^\circ < \theta < 90^\circ$ , la surface de recouvrement croît symétriquement par rapport à l'axe défini par  $\theta=45^\circ$ . Ceci est dû à la forme symétrique de la source utilisée (tous les pôles constituant la source ont les mêmes ouvertures angulaires PO) et à la symétrie du pas de réseau impliqué.

D'autre part, en comparant les variations de la surface de recouvrement et celle du contraste en fonction de l'orientation du réseau de contacts montrées en Figure 3.17.a, nous constatons que ces deux métriques sont correctement corrélées. Autrement dit, parler de la surface de recouvrement revient à parler du contraste comme on l'a vu précédemment.

En comparant l'allure « sinusoïdale » des courbes donnant la variation de la surface de recouvrement et du contraste en fonction de l'orientation du réseau, il apparaît qu'il existe des orientations (qu'on appellera ici limitées) pour lesquelles le contraste est moins important que celui obtenu pour d'autres orientations (qu'on appellera ici non limitées). Pour comprendre la notion d'orientations limitées et non limitées, nous introduisons la notion de seuil. Par exemple, un seuil de 100% est un seuil ne tolérant aucune perte en termes de surface de recouvrement, il définit ainsi la surface de recouvrement maximale. Pour un pas de réseau de 100nm et un seuil de 100%, d'après la Figure 3.17.a donnant les variations de la surface de recouvrement en fonction de l'orientation du réseau, les orientations  $10^\circ < \theta < 80^\circ$  sont des orientations limitées. Réciproquement, les orientations  $0^\circ < \theta < 10^\circ$  et  $80^\circ < \theta < 90^\circ$  sont des orientations non limitées.

Nous nous proposons de faire une étude statistique permettant de définir, pour chaque pas de réseau les orientations limitées et non limitées à partir des résultats de simulation de la surface de recouvrement. Cette étude statistique est basée sur la définition d'un seuil auquel est attribué une valeur donnée de la surface de recouvrement.

Pour chaque pas de réseau, nous avons extrait de la courbe donnant les variations de la surface de recouvrement en fonction de l'orientation du réseau, les orientations limitées et non limitées. Nous avons reporté sur la Figure 3.18.a les orientations limitées et non limitées entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$  pour différents pas de réseau et pour un seuil de 100%.

Le pas de réseau 90nm est un pas critique car pour ce pas de réseau, aucun des premiers ordres de diffraction n'est capté par la pupille et ça pour toutes les orientations du réseau de contacts utilisées. Ainsi, avec la source utilisée pour ces simulations, un réseau de contacts de pas 90nm ne peut être résolu dans aucune direction de l'espace. Le pas 90nm est appelé pas critique et toutes les orientations correspondantes à ce pas sont des orientations interdites montrées en couleur rouge sur la Figure 3.18.a.

Pour le pas de réseau de 95nm, les orientations du réseau entre  $5^\circ$  et  $85^\circ$  donnent des surfaces de recouvrement moins importantes que celle fixée par le seuil de 100% (surface de recouvrement maximale). La Figure 3.18.b illustre ce cas. Ainsi, les orientations entre  $5^\circ$  et  $85^\circ$  sont des orientations limitées et celles entre  $0^\circ$  et  $5^\circ$  puis entre  $85^\circ$  et  $90^\circ$  sont des orientations non limitées. Les orientations limitées et non limitées sont reportées sur la Figure 3.18.a en couleur orange et verte respectivement.

Le même protocole de calculs a été suivi pour déterminer les orientations limitées et non limitées pour d'autres pas de réseau. D'après la Figure 3.18.a, nous remarquons que la surface des régions limitées (en couleur orange) décroît en fonction du pas du réseau jusqu'à s'annuler pour le pas de 115nm. Lorsque le pas de réseau de contacts est égal à 115nm, la surface de recouvrement pour les différentes orientations du réseau est supérieure à 1 (voir Figure 3.19). Dans ce cas, toute la surface de l'ordre 0 participe aux interférences, on est en présence d'interférences à 3 ordres. Ce qui signifie que toutes les orientations correspondantes au pas de réseau de 115nm sont non limitées. Les réseaux de contacts dont le pas est supérieur à celui de 115nm ne présentent aucune orientation limitée.

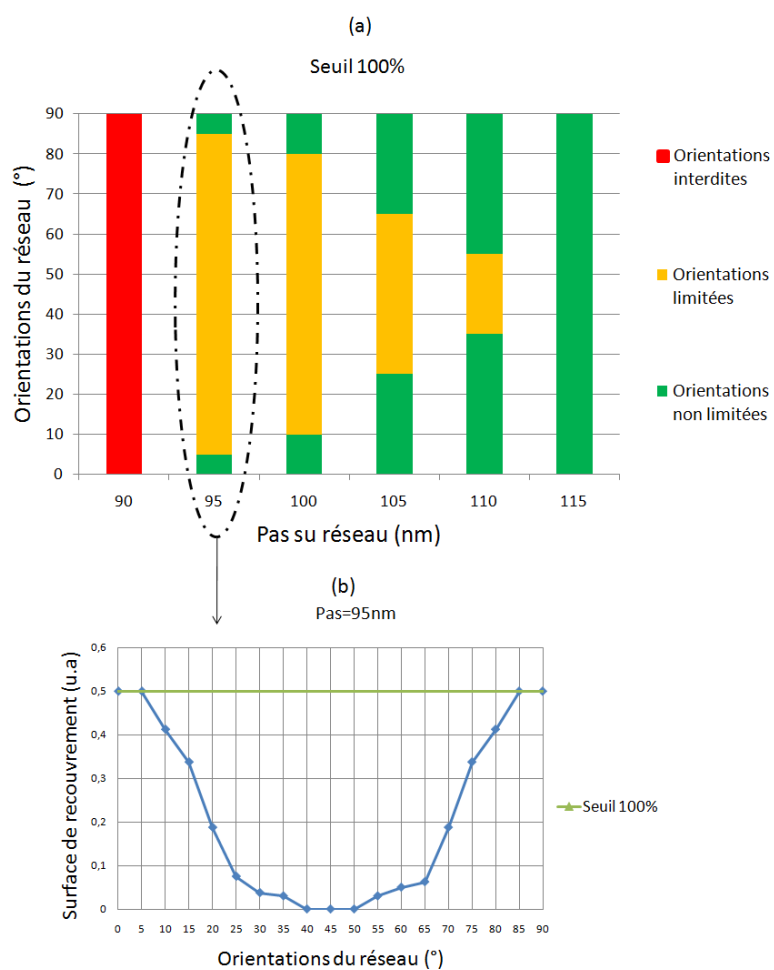


Figure 3.18. a) Orientations limitées et non limitées obtenues pour un seuil de 100%, b) variation de la surface de recouvrement en fonction de l'orientation du réseau de contacts. Simulations obtenues avec une source quadripolaire ( $\lambda=193\text{nm}$ ,  $\text{NA}=1.35$ ,  $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.6/0.8$ ,  $\text{PO}=20^\circ$ )

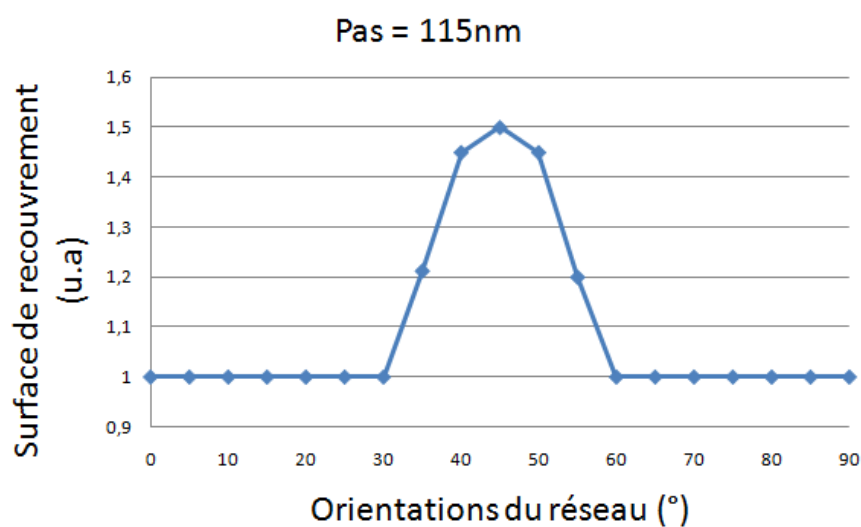


Figure 3.19. Variation de la surface de recouvrement d'un réseau de contacts de pas 115nm illuminé avec une source quadripolaire ( $\lambda=193\text{nm}$ ,  $\text{NA}=1.35$ ,  $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.6/0.8$ ,  $\text{PO}=20^\circ$ ).

Dans le cadre de notre étude statistique, en plus du seuil 100%, nous avons utilisé deux autres seuils : 90% et 50%. Le seuil de 90% signifie que nous tolérons au maximum 10% de pertes en termes de surface de recouvrement. Dans ce cas, nous supposons que l'image formée au minimum avec 90% de la surface de recouvrement maximale est bien définie.

De la même manière, le seuil de 50% signifie une tolérance de 50% en termes de pertes sur la surface de recouvrement. C'est-à-dire que nous admettons qu'une image formée avec 50% de la surface de recouvrement maximale est toujours bien définie. La Figure 3.20.a et la Figure 3.20.b donnent les orientations limitées et non limitées en fonction de différentes valeurs du pas de réseau pour les deux seuils 90% et 50% respectivement.

En comparant les orientations limitées obtenues pour un seuil de 100% (voir Figure 3.18.a), 90% (voir Figure 3.20.a) et 50% (voir Figure 3.20.b), on constate que plus le seuil est petit, plus les régions limitées (définies par les orientations limitées) est moins large. Dans le chapitre suivant, nous allons voir l'impact de ces régions limitées sur le niveau contact d'un circuit. Nous verrons aussi comment utiliser ces résultats pour améliorer la qualité d'impression du niveau contacts lors d'un procédé de double impression.

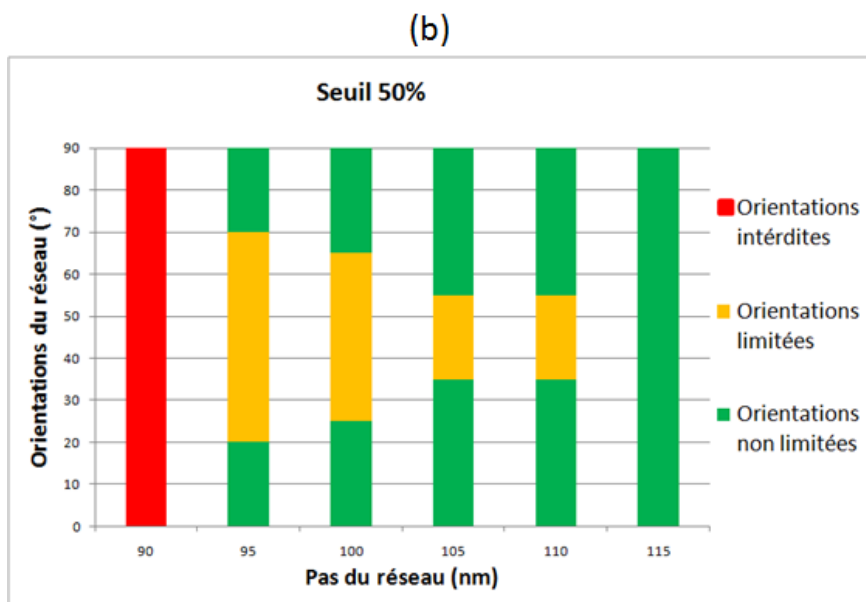
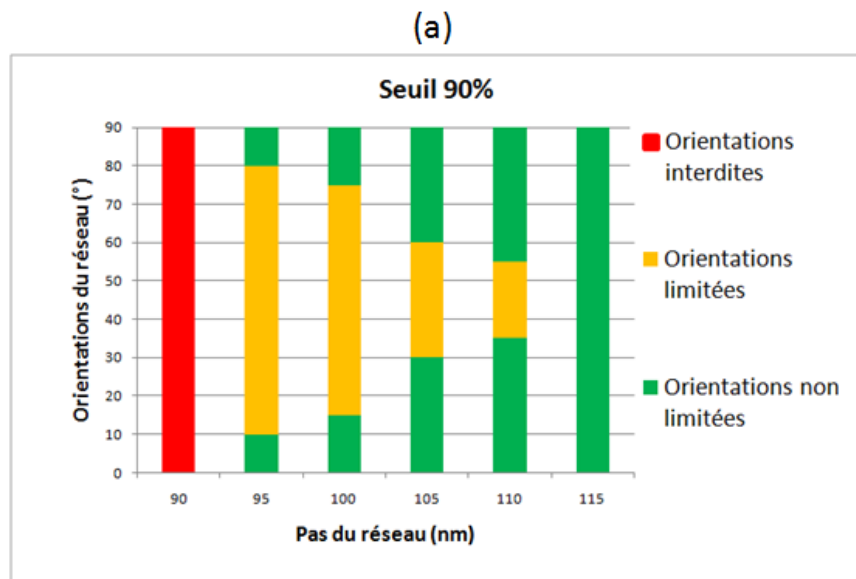


Figure 3.20. Orientations limitées et non limitées obtenues pour un seuil de, a) 90% b) 50% et pour un réseau de contacts illuminé avec une source quadripolaire ( $\lambda=193\text{nm}$ ,  $\text{NA}=1.35$ ,  $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.6/0.8$ ,  $\text{PO}=20^\circ$ )



### 3.5 Méthode de calcul des surfaces de recouvrement

Au cours de cette thèse, nous avons développé une méthode de calcul sous Matlab (voir Annexe 2) qui permet de simuler et de visualiser la figure de diffraction, de calculer les surfaces de recouvrement et de déduire les orientations limitées et non limitées dont le principe a été présenté dans ce chapitre. La méthode de calcul développée présente plusieurs avantages. D'abord, les figures de diffraction peuvent être simulées pour des réseaux périodiques de contacts (2D) ou de lignes (1D). Dans le cas d'un réseau de contacts, les pas selon x et y peuvent ne pas être symétriques ( $\text{pas}_x \neq \text{pas}_y$ ). De plus, le script permet de simuler n'importe quelle orientation ( $\theta$ ) du réseau de contacts ou de lignes utilisé. L'orientation  $\theta$  peut varier de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ . Par exemple, la Figure 3.21.a montre un réseau de lignes parallèles, périodique selon x et orienté avec un angle  $\theta = 45^\circ$ . La Figure 3.21.b montre la figure de diffraction correspondante à ce réseau dans le cas où il est illuminé avec une source quadripolaire. La surface de recouvrement des premiers ordres de diffraction avec la pupille est entourée de couleur rouge sur la Figure 3.21.b.

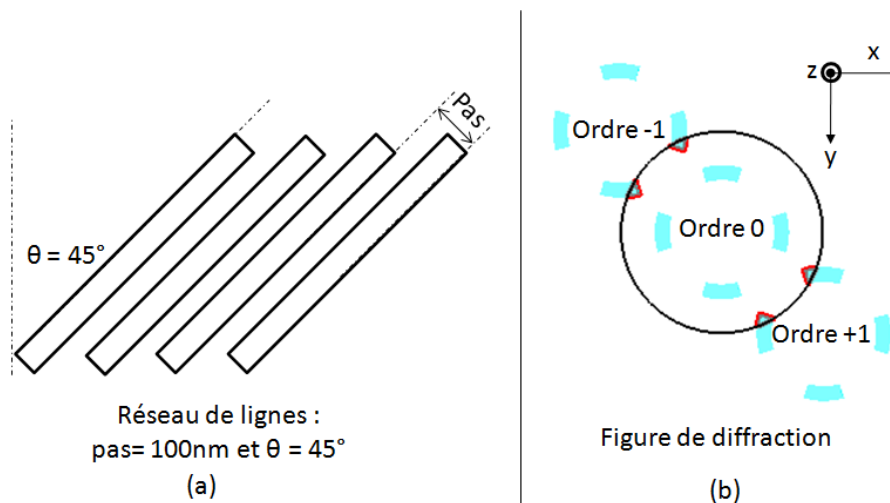


Figure 3. 21. a) illustration d'un réseau de lignes parallèles, de période 100nm selon x et orienté d'un angle de  $45^\circ$  par rapport à l'axe x, b) Figure de diffraction correspondante obtenue pour une illumination quadripolaire ( $\lambda=193$ ,  $\text{NA}=1.35$ ,  $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.7/0.9$  et  $\text{PO}=35^\circ$ )

La méthode développée permet de générer la figure de diffraction non pas en faisant la convolution de la transformée de Fourier du masque par la source mais plutôt par construction géométrique.

Cette dernière est basée sur la définition des coordonnées angulaires de la pupille et des pôles des ordres de diffraction dans le plan de la pupille. D'abord, les coordonnées angulaires de l'ordre 0 permettent de le tracer au centre de la pupille. Puis, grâce à des fonctions « patch » propres à Matlab, les premiers ordres de diffraction sont construits. Les fonctions patch permettent de copier des matrices. En appliquant des fonctions patch à l'ordre 0, on effectue des changements de coordonnées du centre de ce patch dans le plan (x, y) de la pupille définissant ainsi un autre ordre de diffraction. Ces changements de coordonnées sont basés sur la translation d'un patch de l'ordre 0 dans le plan de la pupille en fonction des valeurs de la longueur d'onde et des pas du réseau x et y. Les centres des premiers ordres de diffraction ( $\pm 1$ ) selon x (respectivement selon y) sont espacés du centre de l'ordre 0 d'une distance égale à  $\lambda/pas_x$  (respectivement  $\lambda/pas_y$ ). Dans le cas d'un réseau de contacts, les centres des premiers ordres de diffraction selon les deux diagonales sont espacés du centre de l'ordre 0 d'une

distance égale à  $\sqrt{\left(\frac{\lambda}{pas_x}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{pas_y}\right)^2}$ .

D'autre part, cette nouvelle méthode de calcul laisse le choix à l'opérateur de fixer n'importe quelle valeur de longueur d'onde, d'ouverture numérique ou encore n'importe quel type de source : sources prédéfinies (conventionnelles ou hors axe) ou sources pixelisées (cf. chapitre 1 section 1.5.3.1).

### 3.5.1. Avec une source prédéfinie

La méthode de calcul permet de définir une variété de sources dont le nombre de pôles, l'ouverture angulaire de chaque pôle et la cohérence partielle sont des paramètres à fixer par l'opérateur. Ce dernier peut accéder à tous ces paramètres dans le script et les modifier dans le but de définir la source qu'il souhaite avoir. Le calcul des surfaces de recouvrement dans le cas d'une source classique se calcule pixel par pixel. Considérons par exemple la Figure de diffraction, montrée en Figure 3.22, obtenue pour un réseau de lignes de pas P, périodique selon x et illuminé avec une source dipolaire. La pupille d'ouverture numérique NA est tracée comme un disque de rayon NA.

La pupille est considérée comme une matrice contenant N x N éléments où chaque élément représente un pixel. Le nombre de pixels définissant la matrice de la pupille est défini en fonction de l'échantillonnage choisi dans le script.

Nous avons pris un échantillonnage, sur les deux axes  $x$  et  $y$ , égal à 0.025. Ainsi, la matrice de la pupille d'ouverture numérique  $NA=1.35$  contient  $108 \times 108$  pixels. De plus, nous admettons que l'intensité d'un pixel se trouvant à l'intérieur du disque de la pupille est égale à 1. Tous les pixels se trouvant à l'extérieur du disque de la pupille ont une intensité nulle.

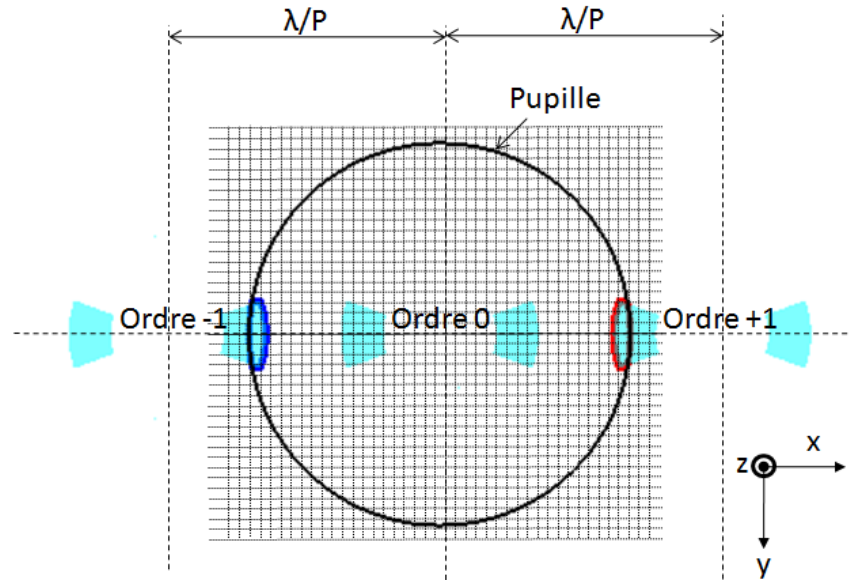


Figure 3.22. Schéma montrant la figure de diffraction d'un réseau de lignes périodique selon  $x$  illuminé avec une source dipolaire ( $\lambda=193\text{nm}$ ,  $NA=1.35$ ,  $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.4/0.7$ ) et un pas de réseau de  $100\text{nm}$

Les ordres de diffraction ( $0, \pm 1$ ) sont définis, de la même manière que la pupille et avec le même échantillonnage, c'est-à-dire par des matrices contenant  $N \times N$  pixels. Pour chaque ordre de diffraction, les pixels qui se trouvent à l'intérieur des pôles définissant l'ordre de diffraction ont une intensité égale à 1. Réciproquement, les pixels des ordres de diffraction qui se trouvent à l'extérieur des pôles définissant l'ordre ont une intensité nulle. Dans le plan de la pupille, chaque pixel est repéré par des coordonnées  $(x, y)$  (voir Figure 3.22).

Pour calculer les surfaces de recouvrement, on ne s'intéresse qu'aux pixels des ordres de diffraction et de la pupille qui ont une intensité égale à 1, on se propose de les appeler pixels actifs. Le principe de calcul de la surface de recouvrement en se basant sur les pixels actifs se fait comme suit :

Si un pixel actif de l'ordre  $\pm 1$  ( $P_{ix}$ ) a des coordonnées  $(x, y)$  qui coïncident avec ceux d'un pixel actif de la pupille, alors ce pixel actif de l'ordre  $\pm 1$  appartient aussi au disque de la pupille. Par conséquent, ce pixel de l'ordre  $\pm 1$  va contribuer au calcul de la surface de recouvrement.

Sur la Figure 3.22, les pixels de l'ordre +1 (respectivement -1) qui contribuent au calcul de la surface de recouvrement sont entourés de couleur rouge (respectivement bleu). Au final, la surface de recouvrement est la somme de tous les pixels vérifiant cette condition normalisée par le nombre de pixel définissant l'ordre 0 comme il est décrit par l'équation 3-21.

$$S = \frac{\sum_x \sum_y P_{\pm 1}(x,y)}{\sum_x \sum_y P_0(x,y)} \quad \text{Tel que : } x^2 + y^2 \leq NA^2 \quad \text{3- 21}$$

Le calcul de la surface de recouvrement dans le cas d'une source « classique » peut se faire d'une manière géométrique (93). La méthode de calcul numérique (pixel par pixel) développée dans ce script présente un intérêt majeur en particulier lors de l'utilisation des sources pixélisées comme on va le voir dans la section suivante.

### 3.5.2. Avec une source pixélisée

La méthode de calcul développé dans le cadre de ces travaux de thèse permet d'utiliser des sources pixélisées pour simuler, visualiser la figure de diffraction dans le but de calculer les surfaces de recouvrement. Contrairement aux sources « classiques », les pôles des sources pixélisées présentent des formes non régulières comme on peut le voir sur un exemple de source pixélisée montrée en Figure 3.23. De plus, les pixels de chaque pôle de la source pixélisée n'ont pas une intensité égale à 1 mais plutôt une intensité comprise entre 0 et 1 (voir Figure 3.23). Dans ce cas, le calcul de la surface de recouvrement se fait pixel par pixel comme il a été présenté dans la section précédente, sauf que l'intensité de chaque pixel n'est pas forcément égale à 1 et peut prendre une valeur entre 0 et 1.

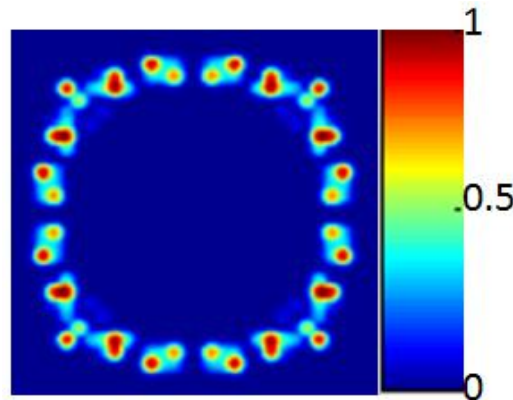


Figure 3.23. Exemple d'une source pixélisée, optimisée pour l'impression du niveau contact d'une mémoire SRAM (de l'anglais *Static Random Access Memory*) du nœud technologique 22nm

Etant donné que les formes géométriques des pôles d'une source pixélisée sont complexes à définir, la méthode de calcul de la surface de recouvrement pixel par pixel présente un grand intérêt pour le calcul de la surface de recouvrement. Dans le script, la source pixélisée peut être chargée en format numérique (souvent en .src) puis utilisée pour simuler une figure de diffraction dans le cas d'un réseau de lignes ou de contacts. La Figure 3.24 montre un exemple de figure de diffraction obtenue avec la source pixélisée présentée plus haut et un réseau de lignes périodique selon x.

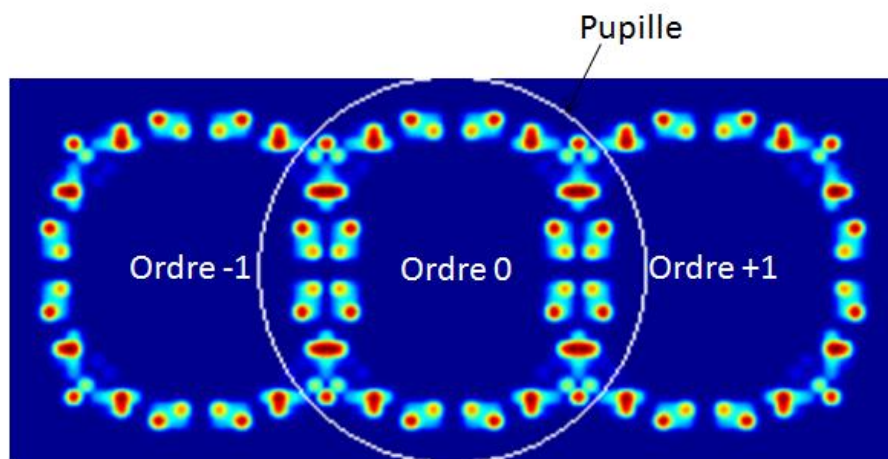


Figure 3.24. Schéma montrant la figure de diffraction d'un réseau de lignes périodique selon x illuminé avec une source pixélisée ( $\lambda=193\text{nm}$ ,  $\text{NA}=1.35$ ) et un pas de réseau de  $110\text{nm}$

La méthode développée dans le cadre de cette étude est très facile à utiliser et permet de déterminer pour une source donnée en fonction de la longueur d'onde et du pas de réseau les orientations du réseau qui seront limitées d'un point de vue optique. L'utilisation de cette méthode reste, pour l'instant, en interne dans l'équipe RET (de l'anglais *Resolution Enhancement Techniques*) de la compagnie STMicroelectronics au sein de laquelle les travaux de cette thèse ont été réalisés. Cette méthode permet d'avoir, assez rapidement, pour une source donnée, une information sur les orientations du réseau qui seront limitées. Dans ces orientations limitées, l'image des motifs à imprimer sera moins contrastée. Les résultats obtenus avec cette méthode sont corrects car ils montrent une bonne corrélation avec les autres métriques lithographiques simulées par le biais de certains logiciels lithographiques. Toutefois, dans le but de pouvoir comparer les surfaces de recouvrement résultantes de différentes sources, il serait intéressant d'améliorer cette méthode de calcul sur deux points particuliers.

D'abord, nous avons considéré le masque comme étant un masque binaire (valeur de l'intensité 1 ou 0) et la valeur du rapport cyclique (rapport entre la largeur des motifs et le pas de réseau) égale à 0.5 (CD=espace). Cependant, on pourrait redéfinir les ordres de diffraction de manière plus rigoureuse tenant compte du facteur de transmission du masque et des rapports cycliques. En théorie, chaque ordre de diffraction peut être décrit dans l'espace des fréquences (espace de la pupille) par un peigne de Dirac  $S$  donné par les équations 3-22 et 3-23.

$$S(v) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n T_n \delta\left(v - \frac{n}{P}\right), \text{ avec } n \text{ entier} \quad \text{3- 22}$$

$$\text{Et } \begin{cases} a_0 = \frac{1}{P} \\ a_n = \frac{\sin(n\pi \frac{l}{P})}{n\pi} = \frac{1}{P} \text{sinc}(n\pi \frac{l}{P}) \end{cases} \quad \text{3- 23}$$

Avec :

$T_n$  est le facteur de transmission du masque

$P$  le pas du réseau et  $l$  est la largeur des motifs. Le rapport  $l/P$  est appelée rapport cyclique.

De plus, il faudra reprendre la normalisation des surfaces de recouvrement. Dans notre cas, la normalisation a été faite par rapport à la source (ordre 0) et toutes les comparaisons des surfaces de recouvrement ont été réalisées pour la même source. Dans ce cas, le choix de la normalisation est correct. Cependant, pour pouvoir comparer les surfaces de recouvrement de différentes sources, il serait judicieux de normaliser par une « constante » comme par exemple la surface de la pupille.

### 3.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, le principe et le détail du calcul de la méthode optique développée dans cette thèse. Nous avons développé une nouvelle méthode de calcul permettant de prédire, pour un réseau de motifs périodiques, les pas et les orientations du réseau qui vont limiter le contraste de l'image aérienne formée au niveau de la plaquette. Cette nouvelle méthode est basée sur le calcul de la surface de recouvrement des premiers ordres de diffraction capturés par la pupille et participant aux interférences à deux ordres. La surface de recouvrement est calculée en fonction des paramètres optiques du système lithographique : la longueur d'onde, l'ouverture numérique de la pupille, l'illumination utilisée et le réseau de motifs étudié.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de gagner du temps lors des simulations et de se passer de la simulation du contraste sur tout un masque, opération qui peut prendre un temps considérable dépendant de la complexité des motifs à imprimer et de la taille du masque. La méthode de calcul développée permet d'avoir une idée sur le contraste de l'image aérienne indépendamment du masque. En effet, cette méthode est basée sur l'analyse des structures denses et périodiques présentes sur le masque.

D'autre part, la méthode développée est très maniable permettant de considérer n'importe quelle valeur de la longueur d'onde, de l'ouverture numérique et du pas de réseau. Par simple souci de simplicité, les résultats présentés dans ce chapitre ont été obtenus pour des pas de réseau équivalents entre l'axe  $x$  et l'axe  $y$ . Cependant, il est possible de simuler, avec cette méthode, n'importe quel réseau de lignes ou de contacts avec des pas selon l'axe  $x$  et l'axe  $y$  qui peuvent être différents. De plus, cette méthode est applicable pour différents types de sources utilisées dans l'industrie de la microélectronique.

Dans le chapitre suivant, nous allons voir comment appliquer les résultats de cette méthode pour définir un nouveau flot de décomposition du niveau contacts des circuits intégrés du nœud 22nm.

# **Chapitre 4**

## **Technique de décomposition optique :**

### **Application au niveau contacts**



## Sommaire

<i>Chapitre 4 Technique de décomposition optique : Application au niveau contacts</i> .....	119
<b>INTRODUCTION</b> .....	121
<b>4.1. Définition des régions limitées pour le niveau contacts</b> .....	121
<b>4.2. Détection des contacts limités</b> .....	126
<b>4.3. Application pour la double impression du niveau contacts du nœud 22nm</b> ...	128
4.3.1. Flot d'optimisation de la décomposition du niveau contacts .....	128
4.3.2. Mise en place d'une décomposition optique.....	132
<b>4.4. Comparaison de l'impression par décomposition géométrique et optique</b> .....	136
4.4.1. EPE minimal.....	138
4.4.2. EPE maximal .....	140
<b>4.5. Conclusion</b> .....	143

# INTRODUCTION

Nous avons présenté dans le chapitre 3 le cadre théorique de la décomposition optique. Nous avons vu par le biais de simulations qu'un réseau de contacts illuminé avec une source quadripolaire ( $\lambda=193\text{nm}$ ,  $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.6/0.8$  et  $\text{PO}=20^\circ$ ), montre des limitations au niveau des pas et des orientations du réseau de contacts. D'une part, les pas inférieurs à 90nm sont des pas critiques car pour ces conditions, il n'y a pas de formation d'image. D'autre part, en fonction de chaque pas de réseau, supérieur à 90nm, certaines orientations sont limitées et cela influe sur la qualité de l'image formée.

En considérant ces deux contraintes (le pas critique de 90nm et les orientations limitées des pas supérieurs à 90nm) nous avons développé une nouvelle méthode de décomposition « la décomposition optique », pour le niveau contacts. Celle-ci, en plus de faire une décomposition géométrique (présentée dans le chapitre 2) qui permet essentiellement de relâcher les pas des contacts critiques sur les deux masques générés, permet d'optimiser l'affiliation des contacts non critiques à un masque ou à un autre en tenant compte des orientations limitées.

Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord la méthode développée permettant de tracer les orientations limitées pour le niveau contacts. Puis, nous verrons comment détecter les contacts limités sur un masque donné. Ensuite, nous présenterons le flot de décomposition optique des contacts. Enfin, nous comparerons, par des simulations, l'impression des contacts décomposés par une décomposition géométrique et une décomposition optique.

## 4.1. Définition des régions limitées pour le niveau contacts

Nous avons développé une méthode permettant de tracer sur un masque donné contenant des contacts, les régions limitées de chaque contact. Comme vu dans le chapitre 2, le pas des contacts est mesuré par la distance centre à centre. Ainsi, nous avons choisi de tracer les régions limitées de chaque contact en partant du centre de celui-ci. Pour comprendre les différentes étapes de construction des régions limitées, considérons par exemple la variation des orientations limitées en fonction des pas de réseau, défini pour un seuil de 50% (cf. chapitre 3 section 3.4.2) et présentée en Figure 4.1. Ici, le choix de 50% est arbitraire, il ne sert qu'à expliquer les étapes de construction des régions limitées.

Par la suite, ces mêmes étapes vont être appliquées pour les autres seuils aussi afin de définir la région limitée de chaque seuil. Les résultats du graphe montré en Figure 4.1 ont été commentés dans le chapitre précédent. C'est pour cette raison qu'ici nous nous permettons de les prendre tels qu'ils sont afin de présenter leur application sur un masque de contacts.

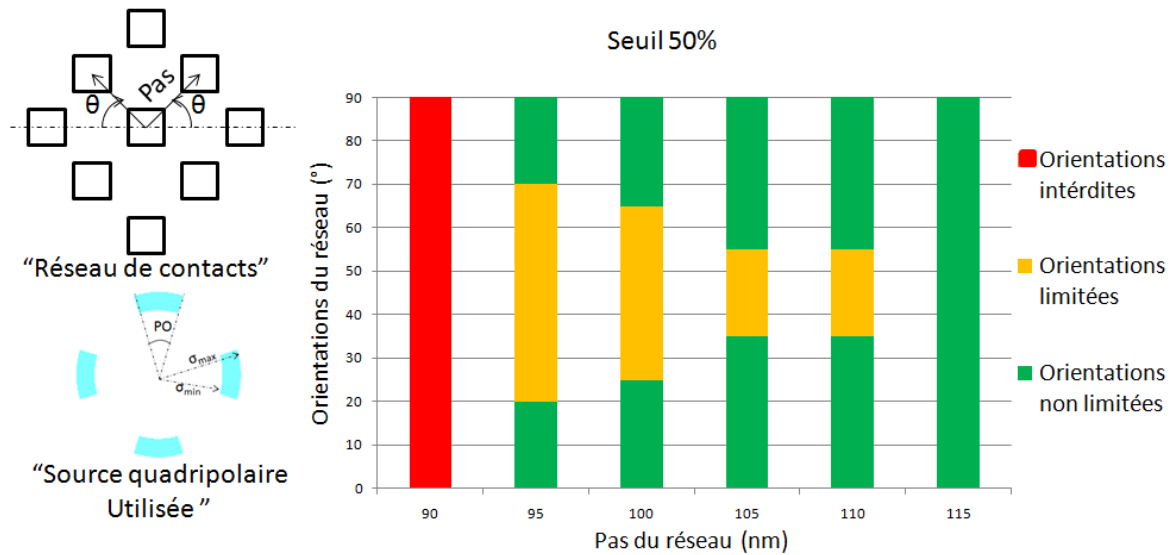


Figure 4.1 Variation des orientations limitées et non limitées en fonction du pas de réseau.

Pour un pas de 90nm, l'image aérienne du réseau de contacts ne peut être formée pour aucune des orientations du réseau (toutes les orientations sont limitées). Dans ce cas, le pas de 90nm est appelé pas interdit. Par conséquent, tous les pas des contacts dessinés sur un masque donné doivent être supérieurs à 90nm. C'est pour cette raison que nous ne simulons pas la région limitée correspondante au pas de 90nm.

Pour un pas de 95nm (voir Figure 4.1), la région délimitée par les orientations  $20^\circ$  et  $70^\circ$  donne un faible contraste, ainsi cette région est dessinée en partant du centre de chaque contact comme il est montré en Figure 4.2.a. Le centre de chaque contact est considéré comme un carré de dimension 1nm x 1nm. De la même manière, pour un pas de 100nm (voir Figure 4.1), les orientations  $25^\circ$  et  $65^\circ$  sont limitées. Ainsi la région entre  $25^\circ$  et  $65^\circ$  est dessinée en partant du centre du contact comme il est montré en Figure 4.2.b.

Dans ce cas (seuil à 50%), les pas de réseau 105nm et 110nm présentent les mêmes orientations limitées entre  $35^\circ$  et  $55^\circ$  (voir Figure 4.1).

Ainsi, nous traçons à partir du centre de chaque contact cette région limitée définie par ces orientations comme il est montré en Figure 4.2.c.

En appliquant ces étapes de traçage, toutes les régions limitées définies dans le quadrant  $0^\circ \sim 90^\circ$  sont additionnées pour former la région limitée du contact dans le premier quadrant. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, la variation des orientations limitées est périodique dans tout l'espace avec une période de  $90^\circ$ . Ainsi, ces mêmes étapes de définition des régions limitées sont appliquées dans tout l'espace pour définir au final la région limitée d'un contact donné montrée en Figure 4.2.d.

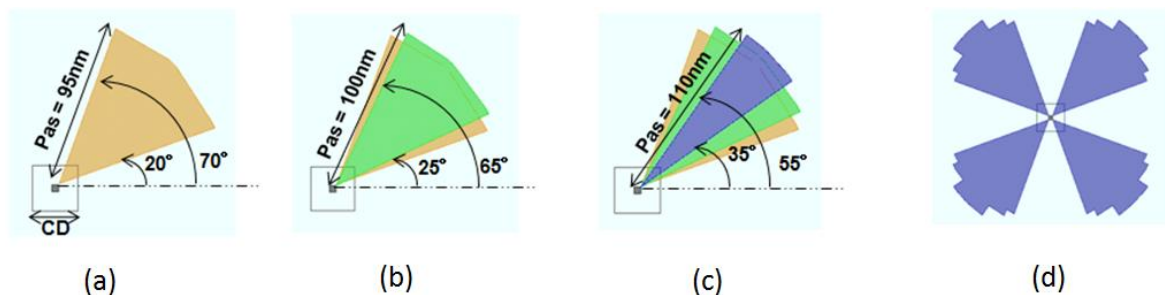


Figure 4. 2. Définition des régions limitées d'un contact donné pour un pas de a) 95nm, b) 100nm, c) 105nm et 110nm d) dans tout l'espace (entre  $0^\circ$  &  $360^\circ$ ).

La méthode développée dans cette partie, permet de tracer les régions limitées des contacts sur un masque donné. Elle a été développée en langage SVRF (de l'anglais *Standard Verification Rule Format*). Ce langage de programmation, développé par la société *Mentor Graphics*, est utilisé en interne à STMicroelectronics. Principalement, ce langage de programmation est basé sur la manipulation géométrique des polygones (de l'anglais *Computational geometry*) (94) (95). Cette manipulation de polygone se fait par le biais d'opérations booléennes (OU, ET, NON, ...etc) ou des fonctions permettant une redéfinition géométrique des polygones (changement de taille, de coordonnées, ...etc). C'est pour cette raison que les formes des contours des régions limitées (au niveau de leurs bases) ne sont pas parfaitement circulaires pour les larges régions limitées en particulier autour de l'orientation  $45^\circ$  comme on peut le voir sur la Figure 4.3.

La Figure 4.3 montre une comparaison entre la base de la région limitée définie pour le pas de 95nm et un cercle de rayon 95nm dessiné, tout comme la région limitée, à partir du centre du contact.

En comparant ces deux contours, on remarque que la seule différence est autour de l'orientation  $45^\circ$  pour laquelle l'erreur de précision dans le traçage de la base de la région limitée (distance entre le contour parfaitement circulaire et la base de la région limitée obtenue) est égale à 1nm (voir Figure 4.3).

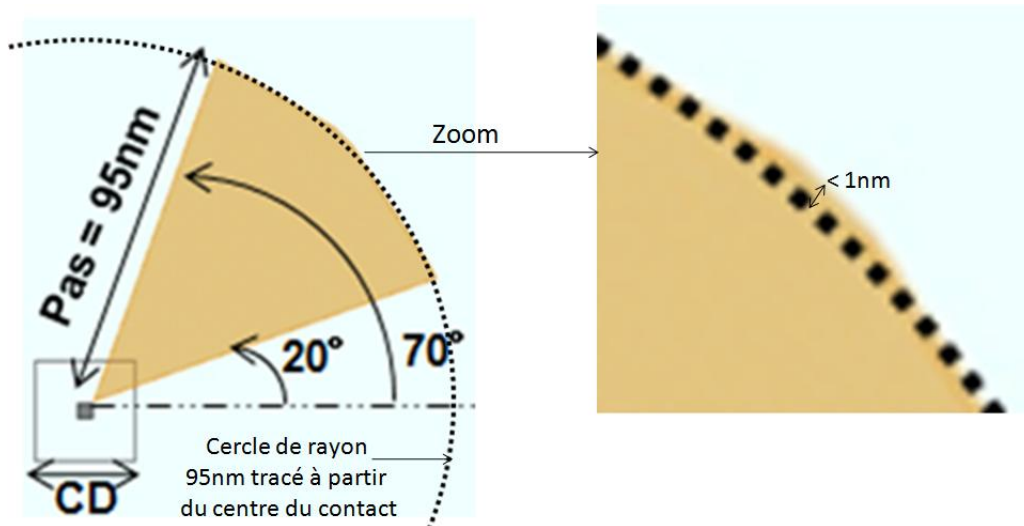


Figure 4. 3 . Comparaison entre le contour de la base de la région limitée défini pour le pas de 95nm et un cercle tracé à partir du centre du contact avec un rayon de 95nm. L'erreur entre les deux contours est inférieure à 1nm

Cependant, ceci n'a pas d'impact sur la forme de la région limitée totale car les régions limitées des pas supérieurs à 95nm viennent recouvrir cette surface « d'erreur » donnée pour le pas de 95nm. De plus, les régions limitées des pas supérieurs à 95nm sont moins larges et donc ont un contour des bases mieux défini (parfaitement circulaire) comme le montre la Figure 4.4. La Figure 4.4 montre une comparaison entre la base de la région limitée totale défini pour un contact donné et un cercle de rayon 105nm dessiné, tout comme la région limitée, à partir du centre du contact même.

En comparant ces deux contours, on remarque que le contour de la base de la région limitée est parfaitement circulaire. Par conséquent, la méthode développée permet le traçage des régions limitées avec une bonne précision.

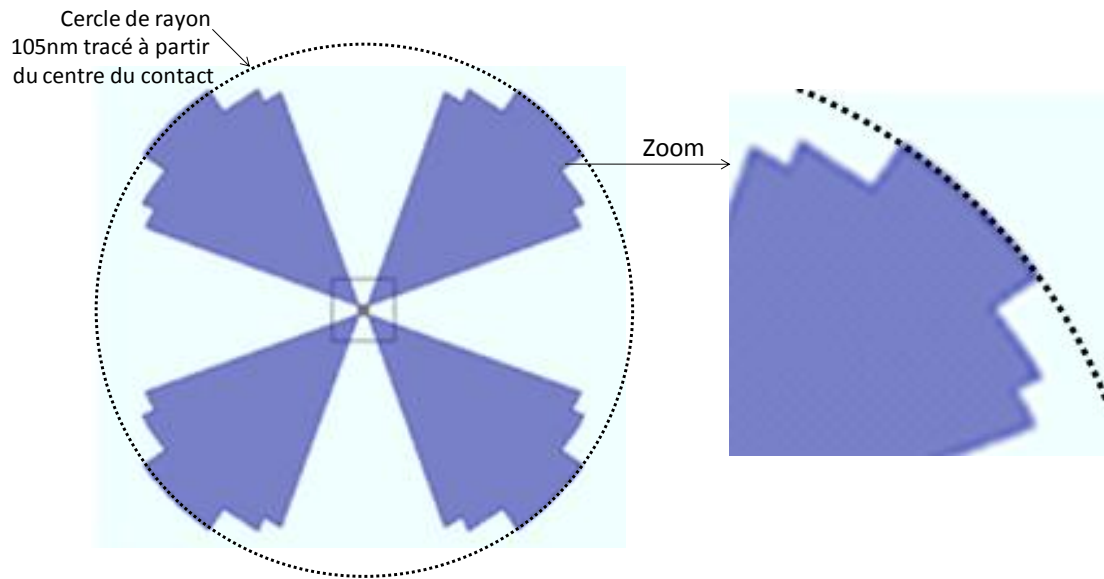


Figure 4. 4. Comparaison entre le contour de la base de la région limitée totale et un cercle tracé à partir du centre du contact avec un rayon de 105nm.

Les étapes de construction des régions limitées, présentées plus haut, ont été appliquées pour tracer les régions limitées détectées pour les autres seuils utilisés dans cette étude : 100% et 90%. Dans le chapitre 4, nous avons vu que plus le seuil est grand, plus l'intervalle des orientations limitées est grand. La Figure 4.5 montre, pour un contact donné, les régions limitées définies pour les seuils de 100%, 90% et 50% en couleur bleu, rouge et vert respectivement. D'après la Figure 4.5, nous remarquons que plus le seuil permettant la détection des régions limitées est grand, plus la région limitée est large. Après le traçage de la région limitée pour un seuil donné, l'étape suivante consiste à utiliser cette région pour détecter les contacts limités sur un masque donné, c'est l'objectif de la partie suivante.

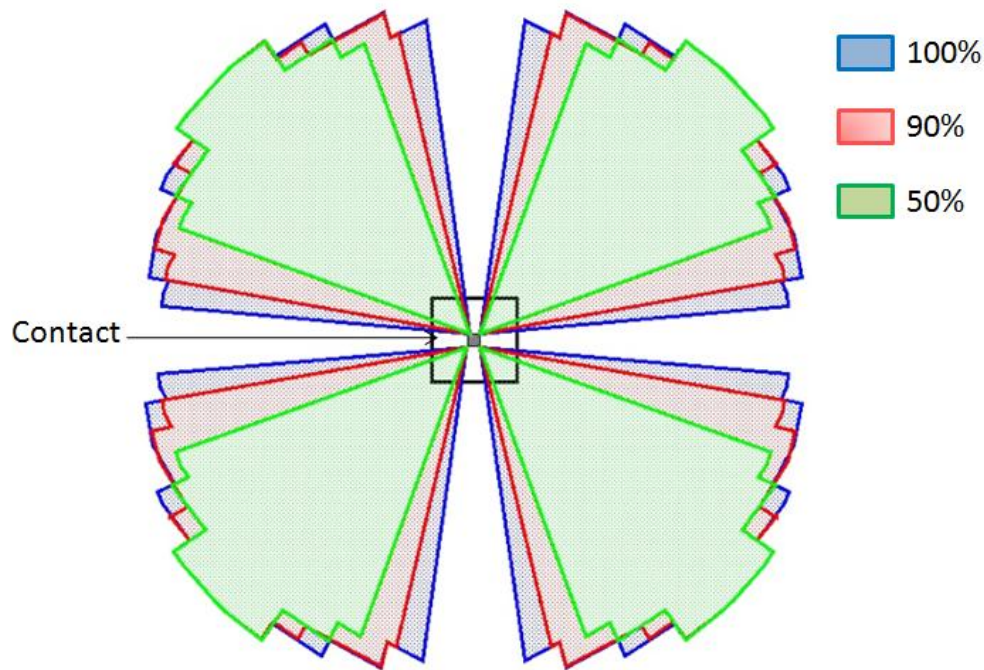


Figure 4.5. Définition de la région limitée pour un contact donné et pour différents seuils : 100% (bleu), 90%(rouge) et 50%(vert).

## 4.2. Détection des contacts limités

Pour mieux comprendre comment se fait la détection des contacts limités sur un masque donné, considérons de nouveau la région limitée définie par un seuil de 50% et tracée à partir du centre de chaque contact comme on vient de le voir dans la section précédente. La Figure 4.6.a montre une partie du masque sur laquelle les contacts ainsi que leurs régions limitées respectives sont représentées.

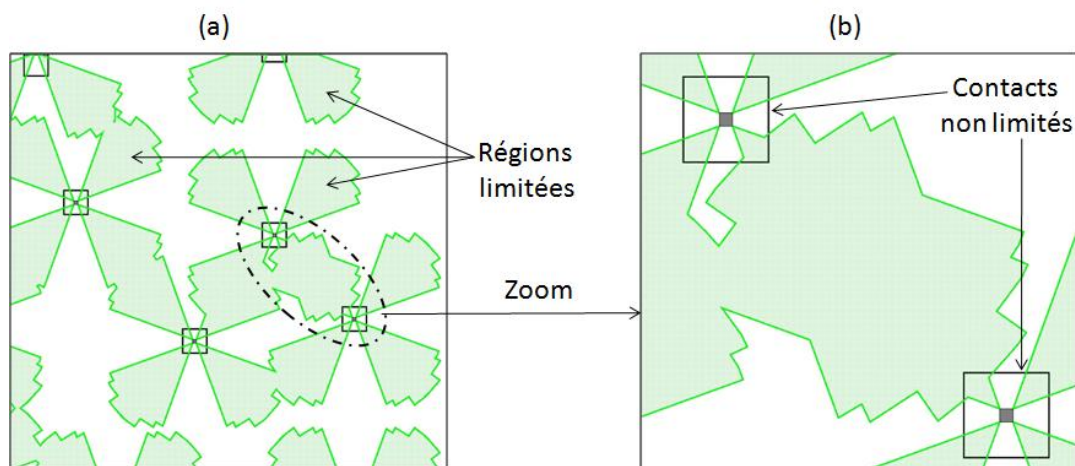


Figure 4.6. a) Une partie d'un masque comprenant quelques contacts ainsi que leurs régions limitées respectives, b) Zoom montrant deux contacts non limités car la région limitée de l'un n'interagit pas avec le centre de l'autre.



Comme nous l'avons évoqué précédemment, le traçage des régions limitées se fait en partant du centre de chaque contact et le pas se mesure par la distance centre à centre. C'est pour ces deux raisons que la détection des contacts limités est basée sur l'interaction géométrique des régions limitées avec les centres des contacts. Plus précisément, il s'agit de vérifier pour chaque contact, défini par son centre et sa région limitée, si sa région limitée interagit ou pas avec le centre d'un des premiers contacts voisins. Dans le cas où la région limitée d'un contact donné n'interagit avec aucun des centres des contacts voisins, comme il est montré en Figure 4.6.b, alors ces contacts sont détectés comme des contacts non limités.

Dans le cas où la région limitée d'un contact donné interagit avec le centre d'un des contacts voisins, comme il est montré en Figure 4.7, alors les deux contacts sont détectés comme deux contacts limités. Autrement dit, ces deux contacts placés sur un même masque vont contribuer à la dégradation du contraste de l'image formée.

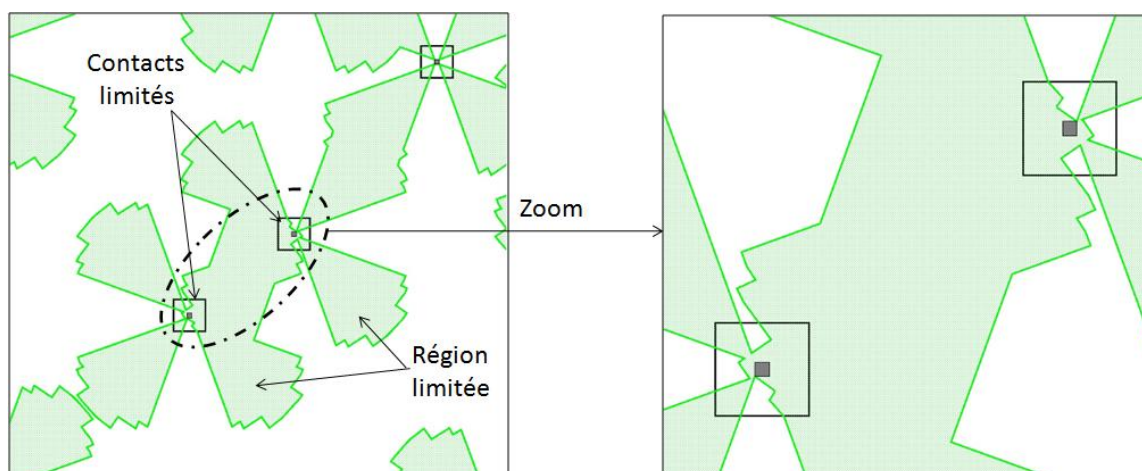


Figure 4.7. Définition de deux contacts limités : la région limitée de l'un interagit avec le centre de l'autre

Lors de la détection des contacts limités, nous avons considéré que l'interaction géométrique de la région limitée d'un contact donné avec le centre d'un des contacts voisins suffit pour que les deux contacts soient détectés comme limités. Etant donné que toutes les régions limitées sont tracées à partir des centres des contacts, il n'est donc pas nécessaire d'avoir un recouvrement total entre le centre du contact et la région limitée. La décomposition optique revient à changer (quand c'est possible) l'affiliation d'un contact limité sur un masque à un autre masque en fonction des régions limitées. Nous allons voir dans la section suivante les différentes étapes permettant de manipuler les contacts limités en vue de changer leurs affiliations à l'un des deux masques utilisés pour la double impression.



## 4.3. Application pour la double impression du niveau contacts du nœud 22nm

Dans cette partie, nous allons détailler le flot d'optimisation de la décomposition du niveau contacts permettant le passage d'une décomposition géométrique vers une décomposition optique. En plus de relâcher les pas des contacts critiques sur les deux masques d'exposition comme le fait la décomposition géométrique, la décomposition optique permet d'affilier des contacts non critiques à un masque ou à un autre. Le but de la décomposition optique est d'améliorer le contraste de l'image des deux masques générés lors de la décomposition. Tous les résultats de cette partie ont été obtenus en utilisant le niveau contacts d'un circuit de logique du nœud technologique 22nm et de taille  $76\mu\text{m} \times 70\mu\text{m}$ .

### 4.3.1. Flot d'optimisation de la décomposition du niveau contacts

Généralement, la préparation du niveau contacts pour la double impression se fait selon les étapes du flot qu'on appelle ici « flot classique » et qui est présenté sur la Figure 4.8.a. Dans un flot classique, les contacts du dessin original du circuit sont décomposés en deux masques différents (masque 1 et masque 2) en utilisant un des outils de décomposition, fourni par des vendeurs de logiciels. Ces outils de décomposition, dits de décomposition géométrique, sont basés sur le pas critique seulement. Ils visent essentiellement à élargir les pas des motifs qui sont, dans ce cas, inférieurs à 90nm (cf. Chapitre 3, section 3.4.1). Ensuite, chacun des deux masques va subir des corrections d'OPC (cf. chapitre 1) afin d'améliorer la qualité de l'image des deux masques lors de l'impression. Nous avons proposé de travailler avec un nouveau flot présenté en Figure 4.8.b dans lequel deux nouvelles étapes de traitement (montrées en rouge sur la Figure 4.8.b) apparaissent entre l'étape de la génération des deux masques par décomposition géométrique et l'étape de l'OPC.

La première étape de traitement consiste à détecter les contacts limités sur chacun des deux masques générés lors de la décomposition géométrique du dessin original. Dans la section précédente, nous avons présenté la méthode permettant la détection des contacts limités basée sur la définition des régions limitées. Ces dernières ont été définies, dans le cadre d'une étude statistique, pour trois seuils différents : 100%, 90% et 50%.

Pour chaque seuil définissant une région limitée, les contacts limités sur chaque masque ont été déterminés. Le nombre ainsi que le ratio des contacts limités détectés sur chacun des deux masques sont présentés sur le Tableau 4.1.

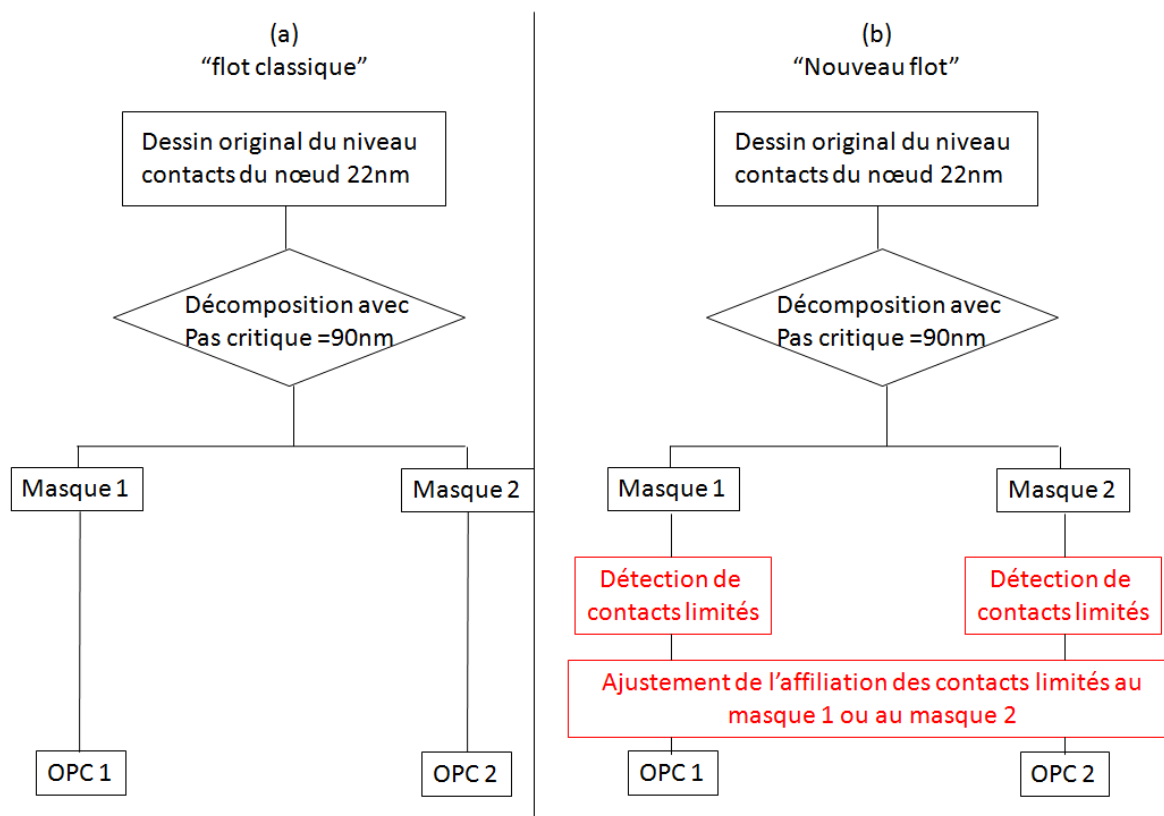


Figure 4.8. Différentes étapes du a) flot classique, b) du nouveau flot de traitement pour la double impression du niveau contact.

	Masque 1	Masque 2
Nombre de contacts	93 874	93 833
Nombre de contacts limités (seuil 100%)	16 505 (17.58%)	16 242 (17.30%)
Nombre de contacts limités (seuil 90%)	16 212 (17.26%)	15 933 (16.98%)
Nombre de contacts limités (seuil 50%)	16 075 (17.12%)	15 788 (16.82%)

Tableau 4. 1. Nombre de contacts sur chacun des deux masques obtenus suite à une décomposition géométrique d'un circuit de  $76\mu\text{m} \times 70\mu\text{m}$  en utilisant un pas critique de 90nm. Nombre et ratio des contacts limités pour différents seuils

A partir du Tableau 4.1, nous remarquons que pour les trois seuils impliqués dans cette étude, environ 17% de contacts présents sur chacun des deux masques sont limités et vont avoir un faible contraste contribuant ainsi à la dégradation du contraste total de chacun des deux masques.

D'autre part, nous avons vu dans la section 4.1 que la diminution du seuil de détection des régions limitées donne des régions limitées moins larges. On aurait ainsi tendance à penser que plus le seuil de détection des régions limitées est faible, plus le ratio de contacts limités sera faible aussi. Or ce n'est pas ce que l'on constate en comparant les ratios des contacts limités obtenus pour les trois différents seuils et présentés dans le Tableau 4.1. En effet, les seuils choisis (100%, 90% ou 50%) donnent des ratios de contacts limités sur chaque masque qui restent globalement les mêmes.

Cette constatation s'explique par le fait que la majorité des contacts présents sur chacun des deux masques, utilisés dans ce cas, se trouvent dans des configurations géométriques définies par le seuil de 50%. Les résultats du Tableau 4.1 nous permettent de calculer la différence entre les pourcentages de contacts limités pour chaque masque. Nous déduisons ainsi une information sur les orientations des contacts sur chacun des deux masques :

- Environ 83% de contacts se trouvent dans des configurations qui ne sont pas limitées d'un point de vue optique (comme montré en Figure 4.9.a).
- Environ 0.32% des contacts se trouvent dans les portions de surfaces définies par la différence entre les régions limitées définies par les seuils 100% et 90% (comme montré en Figure 4.9.b).
- Environ 0.14% des contacts se trouvent dans les portions de surface définies par la différence entre les régions limitées définies par les seuils 90% et 50% (comme montré en Figure 4.9.c).
- Environ 17% de contacts se trouvent dans la région limitée définie par le seuil de 50% (comme montré en Figure 4.9.d).

Etant donné qu'il n'y a pas une grande différence entre les ratios des contacts limités détectés pour les trois seuils utilisés dans cette étude, nous nous proposons de considérer les contacts limités détectés pour l'un des trois seuils dans le but de continuer à expliquer le flot d'optimisation que nous avons proposé. Considérons par exemple les contacts limités détectés sur chacun des deux masques et pour un seuil de 100%.

La deuxième étape de traitement du nouveau flot proposé consiste à ajuster l'affiliation des contacts limités à un masque ou à un autre. Plus particulièrement, il s'agit d'étudier la possibilité d'affilier un contact limité sur un masque à un autre masque dans le but de « lever » cette limitation. Dans la section suivante, nous présentons les détails de cette deuxième étape de traitement.

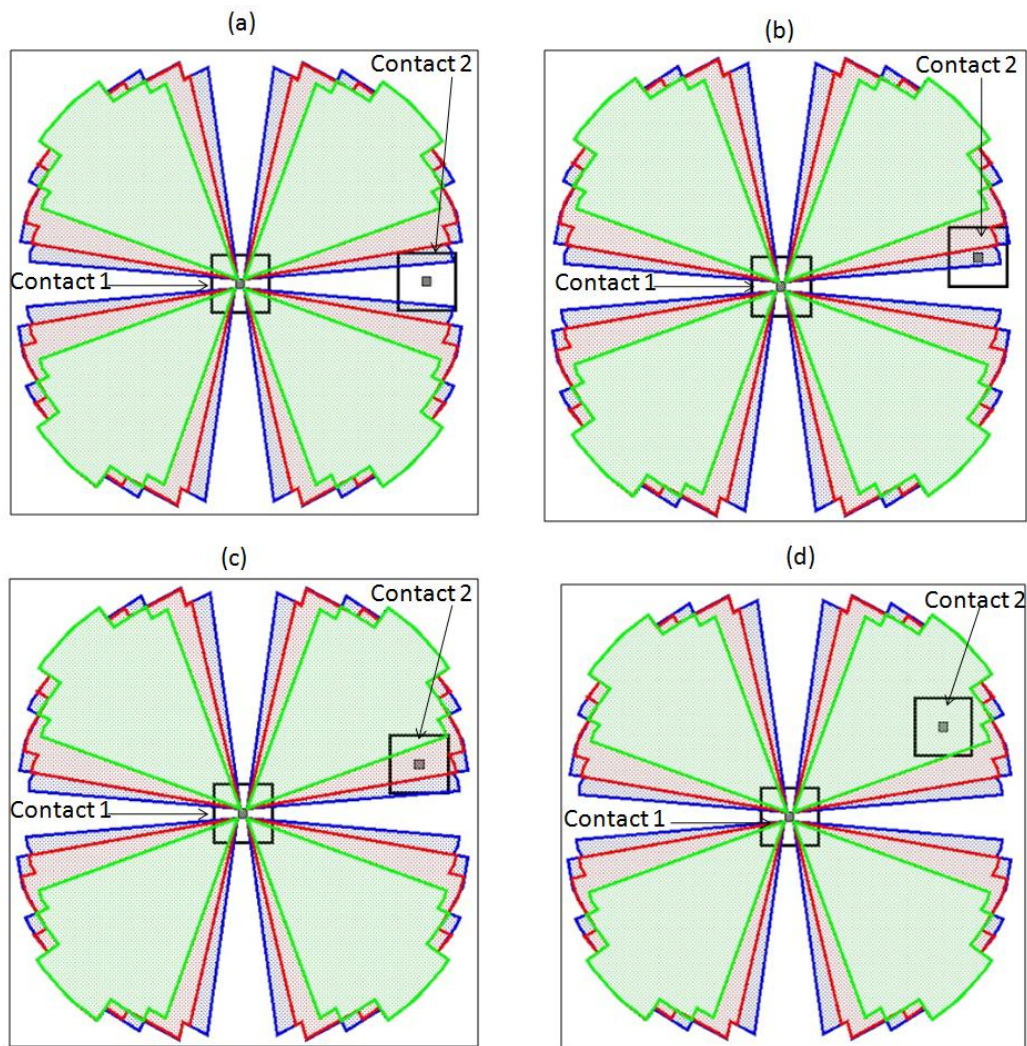


Figure 4.9. a) deux contacts définis dans une orientation non limitée. Deux contacts détectés comme limités dans : a) la région définie par le seuil 100% seulement, c) les régions définies par les seuils 100% et 90% seulement, d) les régions définies par les seuils 100%, 90% et 50%.

### 4.3.2. Mise en place d'une décomposition optique

Le passage de la décomposition géométrique à la décomposition optique repose sur le traitement des contacts limités sur chacun des deux masques. Plus précisément, il s'agit d'étudier la possibilité d'affilier un contact limité sur un masque, à l'autre masque. Le but étant de minimiser, autant que possible, le nombre de contacts limités sur chacun des deux masques dans le but d'augmenter leurs contrastes. Affilier les contacts limités sur un masque à un autre masque implique la considération, à la fois, des contacts limités, des contacts non limités et des régions limitées dessinées sur les deux masques générés lors de la décomposition géométrique.

De plus, ce changement d'affiliation ne se fait pas d'une manière aléatoire et doit respecter certaines règles. Les trois règles du flot d'affiliation d'un contact limité sur le masque 1 au masque 2 sont décrites sur la Figure 4.10. Réciproquement, ces mêmes étapes sont appliquées aux contacts limités du masque 2. Rappelons qu'initialement, les masques 1 et 2 sont obtenus par décomposition géométrique du niveau contacts utilisant un pas critique de 90 nm. Comme vu dans le chapitre 3, le pas de 90 nm ne peut pas être résolu lors d'une simple exposition lithographique.

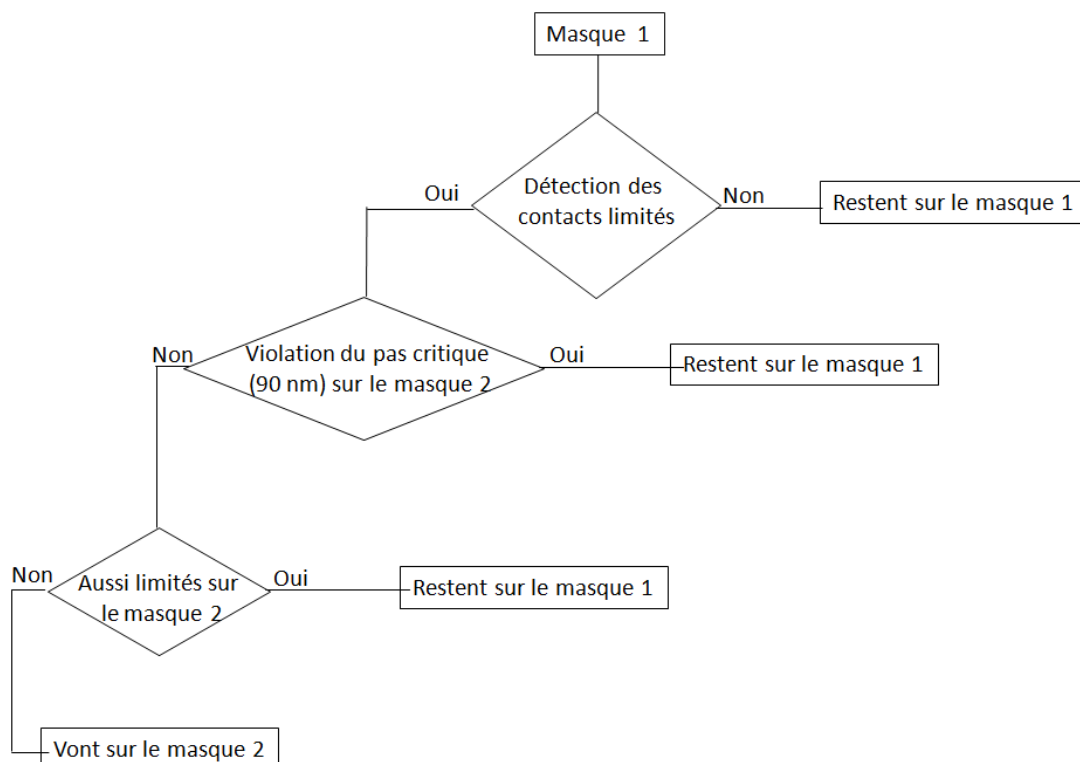


Figure 4.10. Flot d'optimisation de la décomposition du niveau contacts : d'une décomposition géométrique vers une décomposition optique.

La première étape du flot d'optimisation de la décomposition consiste à détecter sur le masque 1 les contacts limités et les contacts non limités (voir Figure 4.11). Notons que par soucis de clarté, nous avons fait le choix de ne pas représenter sur la Figure 4.11 les régions limitées. Les contacts non limités sur le masque 1 restent affiliés au masque 1 et ne vont subir aucun traitement. Tandis que les contacts limités sur le masque 1 vont subir les étapes de traitement suivantes qui ont pour but de vérifier la possibilité d'affilier certains contacts limités sur le masque 1 au masque 2.

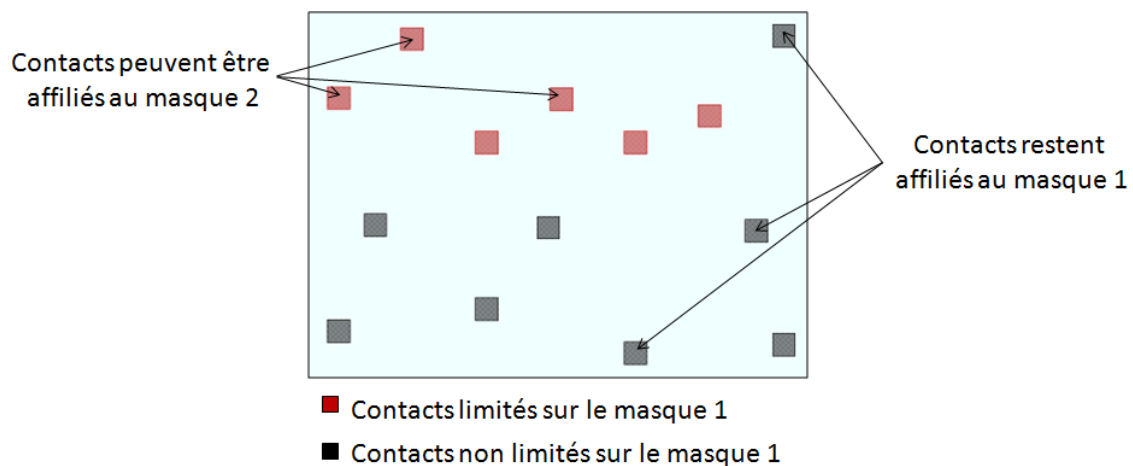


Figure 4.11. Une partie du masque 1 montrant des contacts limités qui vont subir des traitements pour valider ou pas le changement d'affiliation de certains d'entre eux et des contacts non limités qui restent affiliés au masque 1.

La deuxième étape du flot d'optimisation de la décomposition consiste à vérifier la violation ou pas de la première règle de décomposition (règle du pas critique) suite à l'affectation d'un contact limité sur le masque 1 au masque 2. Dans le cas où un contact limité sur le masque 1 est affilié au masque 2 créant ainsi une violation du pas critique avec les premiers contacts voisins sur le masque 2, alors le contact limité du masque 1 reste affilié à celui-ci (voir Figure 4.12.a). En effet, le but de la décomposition est d'avoir, sur chacun des deux masques générés, des contacts dont les pas sont supérieurs aux pas critique. Dans le cas contraire où l'affiliation d'un contact limité sur le masque 1 au masque 2 ne crée aucune violation du pas critique avec ses premiers voisins sur le masque 2 (voir Figure 4.12.b), alors le contact limité du masque 1 pourrait être affilié au masque 2 et va donc subir l'étape suivante du flot.





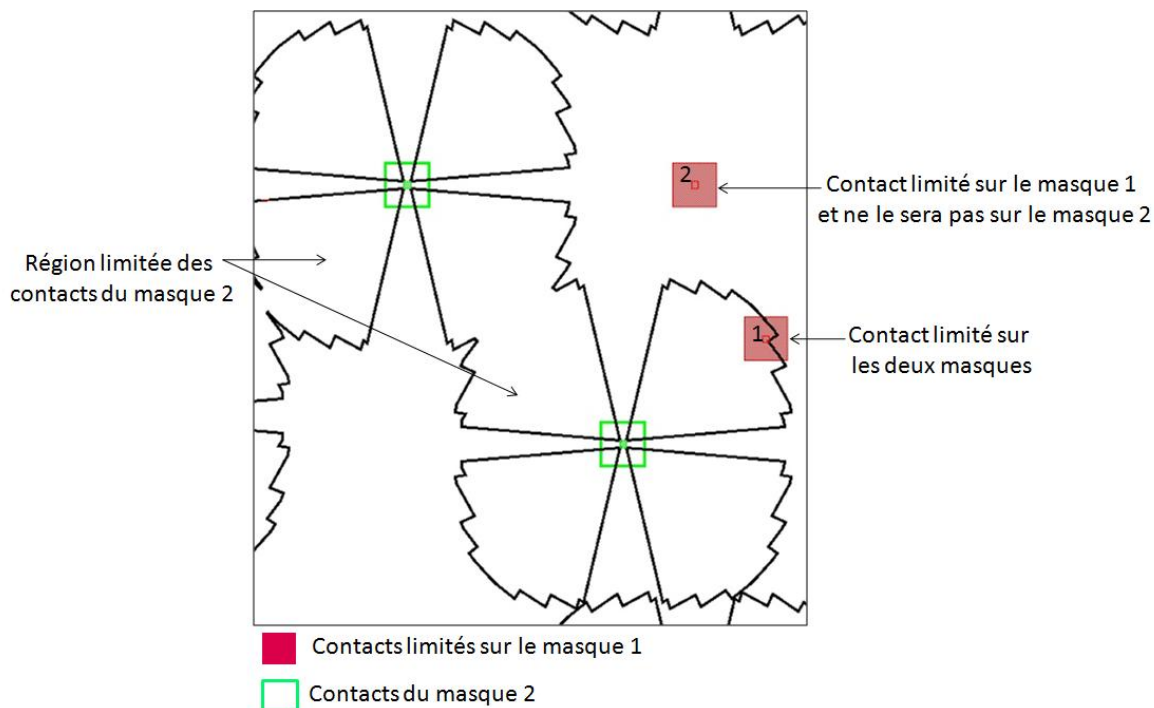


Figure 4.13. Le contact 1 est limité sur les deux masques, ainsi il reste affilié au masque 1. Le contact 2 est limité sur le masque 1 mais ne le serait pas sur le masque 2, ainsi il est affilié au masque 2.

En appliquant toutes ces étapes, la décomposition du niveau contacts a été améliorée d'une décomposition géométrique en une décomposition optique. Ainsi, deux nouveaux masques sont générés par décomposition optique. Le nombre de contacts limités a été réduit sur chacun des deux masques de 17% (décomposition géométrique) à ~5% (décomposition optique) comme le montre le Tableau 4.2. Rappelons que cette étape de détection des contacts limités se fait avec les régions limitées définies pour un seuil de 100%. Les contacts limités ~5% qui sont toujours présents sur chacun des deux masques ne peuvent pas être optimisés plus en utilisant seulement deux masques. Dans la prochaine section, nous allons comparer la qualité d'impression des masques obtenus par décomposition géométrique et optique.

	Décomposition géométrique	Décomposition optique
Contacts limités sur le masque 1	17,58%	5,50%
Contacts limités sur le masque 2	17,30%	5,69%

Tableau 4. 2. Ratios des contacts limités sur chacun des deux masques obtenus par décomposition géométrique et optique pour un seuil de 100%.



## 4. 4. Comparaison de l'impression par décomposition géométrique et optique

Le but de cette partie est de comparer la qualité d'impression des contacts, à la fin du procédé de double impression, utilisant deux masques obtenus par décomposition géométrique, puis deux autres masques obtenus par décomposition optique. Les quatre masques ont subis les mêmes traitements d'OPC (cf. chapitre 1) avant impression. Des simulations d'impression des contacts ont été réalisées avec la source quadripolaire définie dans le chapitre 4 et pour une fenêtre de procédé définie par :  $\pm 40$  nm de defocus,  $\pm 5\%$  de dose et  $\pm 1$  nm d'erreur CD sur le masque. Les variations de la fenêtre de procédé définissent d'éventuelles erreurs liées à la précision du scanner et à la variabilité de la fabrication du masque. En pratique, la simulation de l'impression des contacts avec différentes conditions de fenêtre de procédé nous permet d'avoir une idée sur la qualité d'impression des contacts. La Figure 4.14.a donne un exemple de contours d'impression générés pour un contact donné et pour différentes conditions de la fenêtre de procédé. Chaque contour représente le contour du contact imprimé pour une condition de fenêtre de procédé. En pratique, l'impression du contour se fera « quelque part » entre le contour maximal et le contour minimal qui correspondent au plus large et au plus petit contour respectivement de tous ceux générés lors de la simulation comme montré sur la Figure 4.14.b.

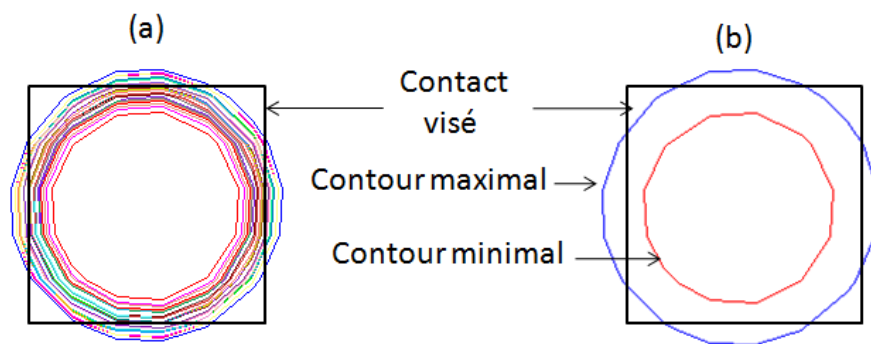


Figure 4.14. a) Génération de différents contours d'impression pour différentes conditions de la fenêtre de procédé, b) Contour maximal (bleu) et minimal (rouge) de la simulation de l'impression

Les contours maximal et minimal doivent être les plus proches possible des côtés du contact visé. Plus le contour maximal est « loin » des côtés des contacts visés, plus le risque de pontage avec les contacts voisins est grand. La Figure 4.15.a montre une image SEM (de l'anglais *Scanning Electron Microscopy*) décrivant le pontage d'un réseau de contacts.

Réciproquement, plus le contour minimal est « loin » des côtés des contacts visés, plus le risque de non impression des contacts est grand comme le montre la Figure 4.15.b. C'est pour cette raison que parmi tous les contours générés lors de nos simulations, on ne s'intéresse dans cette étude qu'au contour maximal et minimal.

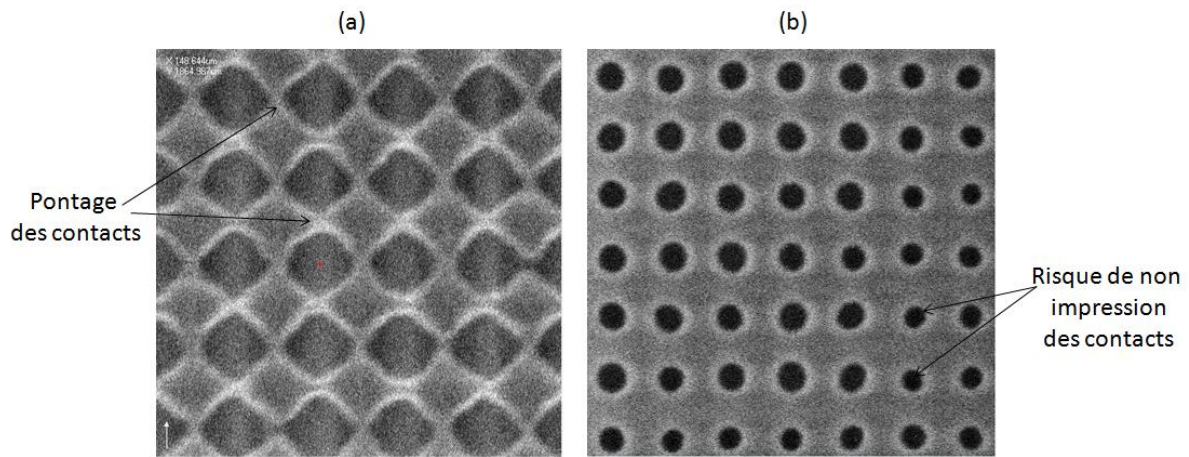


Figure 4. 15. Images SEM montrant : a) pontage d'un réseau de contacts, b) risque de non impression de certains contacts par rapport aux autres.

Notre méthode d'analyse consiste à mesurer (par le biais d'une méthode de calcul que nous avons développée) pour chaque contact et pour chaque contour, les espacements appelés EPE (de l'anglais *Edge Placement Error*, cf.chapitre 1). L'EPE est la distance mesurée à partir du milieu de chaque côté du contact vers un contour donné. La manière de mesurer l'EPE pour le contour maximal et minimal est montrée en Figure 4.16.a et b respectivement.

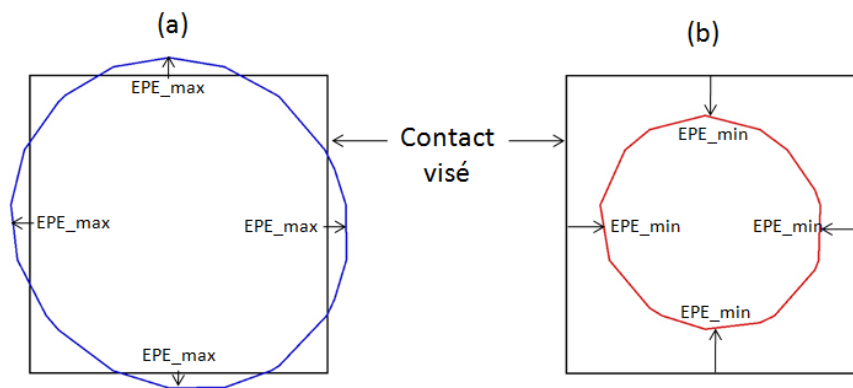


Figure 4.16. Schéma illustrant la manière de mesurer pour un contact donné, a) l'EPE maximal et b) l'EPE minimal

Ainsi, les valeurs d'EPE peuvent être positives ou négatives selon le « positionnement » du contour en question par rapport au milieu de chaque côté du contact visé. Pour un contour donné, chaque contact est caractérisé par quatre valeurs d'EPE. Le calcul des EPE permet de déterminer la qualité d'impression des contacts. L'EPE maximal est représentatif du risque de pontage avec les contacts voisins (de l'anglais *contact bridging risks*). Plus l'EPE maximal est grand, plus l'impression du contact s'éloigne du contact visé (grand contour maximal) impliquant ainsi un haut risque de pontage avec les contours voisins.

D'autre part, l'EPE minimal est représentatif du risque de non impression du contact. Plus l'EPE minimal est grand (petit contour minimal), plus la taille du contact imprimé sera petite devant celle visée impliquant ainsi un haut risque de la non impression du contact en question (de l'anglais *contact missing risks*).

Plus les contours maximal et minimal se rapprochent des côtés des contacts visés, plus les valeurs des EPE (maximal et minimal) tendent vers la valeur 0 définissant les côtés du contact visé. Dans ce cas, les contours d'impression du contact sont plus proches des côtés du contact impliquant ainsi une impression plus fidèle. Dans ce cas, les risques de non impression ou de pontage des contacts sont réduits.

Dans le but d'évaluer la qualité d'impression des contacts dans le cas des décompositions géométrique et optique, nous avons analysé l'EPE minimal, maximal ainsi que l'EPE nominal obtenus pour les contacts avec les deux types de décomposition. Dans les sections suivantes, nous analysons les résultats de chaque type d'EPE.

#### 4.4.1. EPE minimal

La Figure 4.17 montre le contour minimal de certains contacts obtenus à la fin du procédé de double impression par décomposition géométrique (contours en bleu) et décomposition optique (contour en rouge). Lors de la décomposition géométrique, les contacts « 1 » et « 2 » (voir Figure 4.17) sont mis sur le même masque d'exposition. Cependant, ces deux contacts sont dans une orientation limitée. En utilisant le flot d'optimisation de la décomposition présenté en section 4.3.2, les contacts « 1 » et « 2 » sont mis sur deux masques séparés.

En comparant les contours minimaux obtenus par décomposition géométrique et optique, nous remarquons que les contours minimaux des contacts « 1 » et « 2 » sont plus larges dans le cas d'une décomposition optique comparé au cas d'une décomposition géométrique, ce qui signifie que l'aire définie par les contours minimaux dans le cas d'une décomposition optique est plus proche de l'aire du contact visé que celle obtenue dans le cas d'une décomposition géométrique. Dans ce cas, le risque de non impression des contacts est diminué en utilisant la décomposition optique.

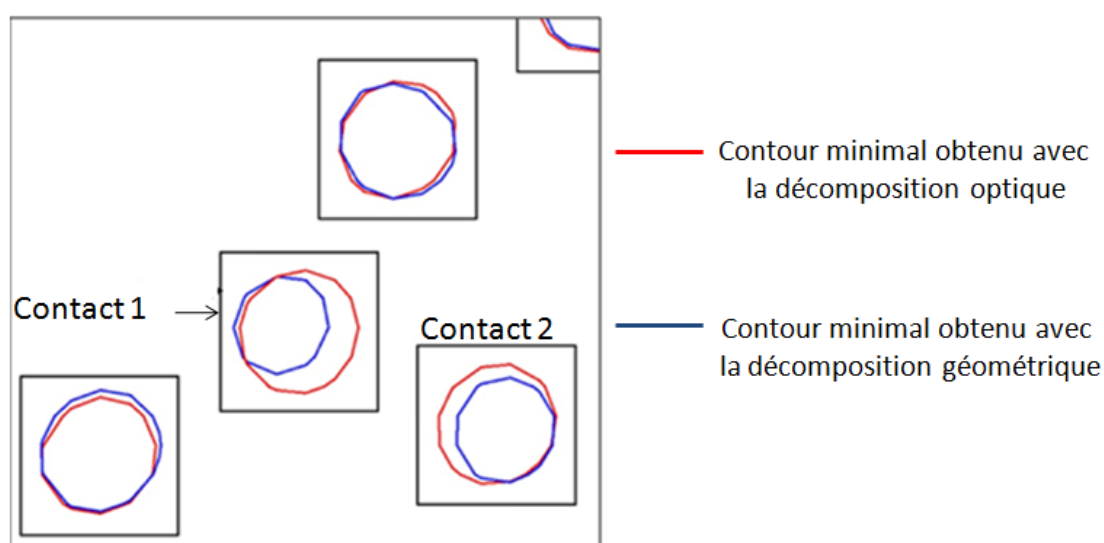


Figure 4.17. Contours minimaux de certains contacts obtenus avec la décomposition géométrique (bleu) et la décomposition optique (rouge)

Pour pouvoir quantifier ce gain, l'EPE minimal a été calculé au milieu de chaque côté de contact dans le cas des décompositions géométrique et optique. La Figure 4.18.a montre les histogrammes donnant le nombre de cas de chaque valeur d'EPE minimal pour les décompositions géométrique (bleu) et optique (rouge). Globalement, les deux histogrammes semblent avoir la même distribution et sont centrés sur la même valeur d'EPE minimal (-9 nm).

Cependant la différence entre les deux histogrammes se trouve au niveau de la « queue » donnant les plus petites valeurs d'EPE minimal comme on peut le voir dans le zoom montré en Figure 4.18.b. Avec la décomposition optique, le nombre de cas où les valeurs de l'EPE minimal sont petites est réduit comparé à la décomposition géométrique. Dans ce cas, la plus petite valeur de l'EPE minimal est augmentée de 3nm réduisant ainsi le risque de non impression de certains contacts.

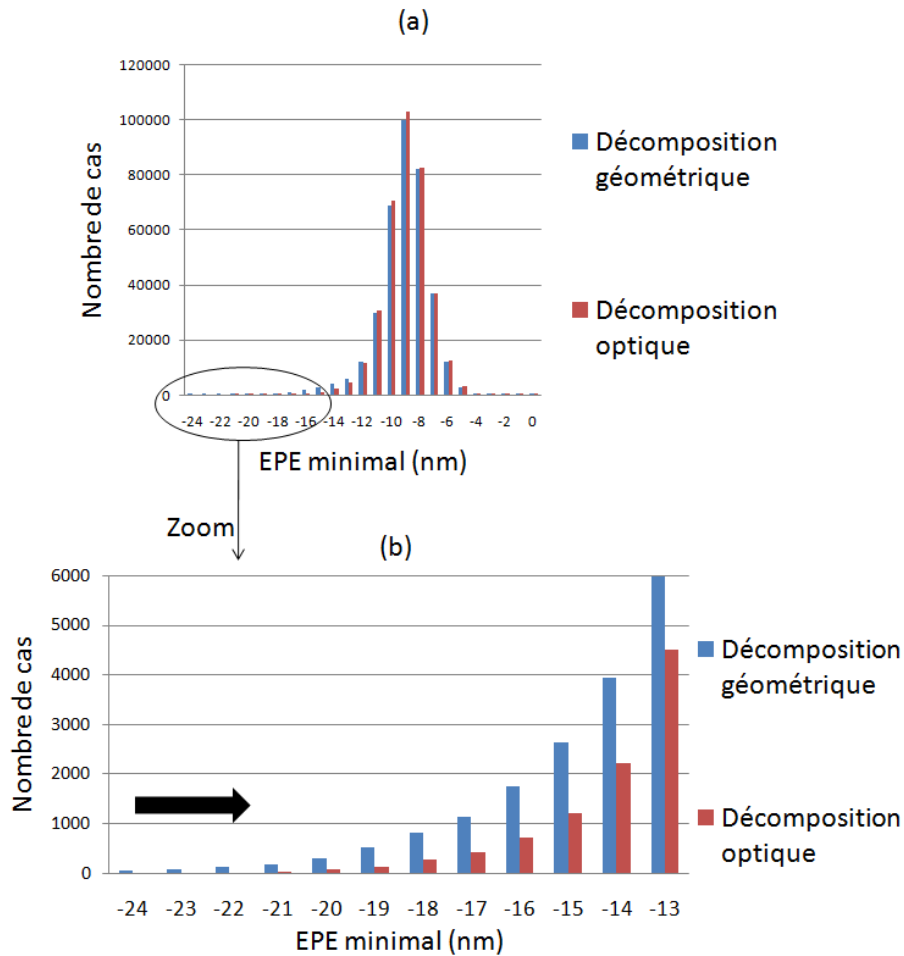


Figure 4.18. a) Histogrammes comparant le nombre de cas de l'EPE minimal dans pour les décompositions géométrique et optique, b) Zoom sur les petites valeurs d'EPE minimal montrant un gain de 3nm avec la décomposition optique comparé à la décomposition géométrique

#### 4.4.2. EPE maximal

La Figure 4.19 montre le contour maximal de certains contacts obtenus à la fin du procédé de double impression par décomposition géométrique (contours en bleu) et décomposition optique (contour en rouge). Avec la décomposition géométrique, les contacts « 1 » et « 2 » sont mis sur le même masque. Cependant, ces deux contacts sont limités d'un point de vue optique.

Dans ce cas, la simulation des contours maximaux d'impression de ces contacts montre un haut risque de pontage (voir Figure 4.19.a, contour bleu) et un cas de pontage (voir Figure 4.19.b, contour bleu). En utilisant la décomposition optique dont les étapes ont été présentées dans les sections précédentes, les contacts « 1 » et « 2 » sont mis sur deux masques différents lors de la décomposition.

A la fin du procédé de double impression, les cas de haut risque de pontage sont réduits (voir Figure 4.19.a, contour rouge) et les cas de pontage sont évités (voir Figure 4.19.b, contour rouge).

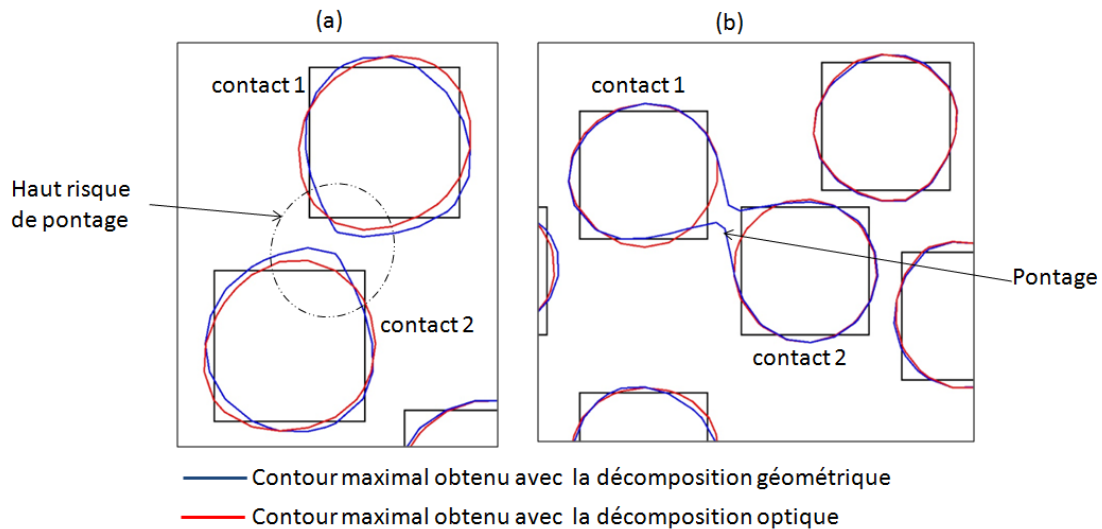


Figure 4.19. Contour maximal de certains contacts : a) haut risque de pontage, b) cas de pontage, évités avec la décomposition optique (rouge) comparé à la décomposition géométrique (bleu)

Dans le but de quantifier ce gain obtenu avec la décomposition optique, l'EPE maximal a été calculé pour chaque contact. La Figure 4.20.a montre les histogrammes donnant le nombre de cas de chaque valeur de l'EPE maximal calculée avec la décomposition géométrique (en bleu) et la décomposition optique (en rouge). Les deux histogrammes semblent avoir la même distribution et sont centrés sur la même valeur d'EPE maximal (4nm). Cependant, la différence entre ces deux histogrammes se trouve au niveau des grandes valeurs d'EPE maximal comme montré en Figure 4.20.b. En utilisant la décomposition optique, le nombre de cas pour les grandes valeurs de l'EPE maximal est réduit comparé à la décomposition géométrique. Dans ce cas, la plus grande valeur de l'EPE maximal est diminuée de 3nm réduisant ainsi le risque de pontage de certains contacts.

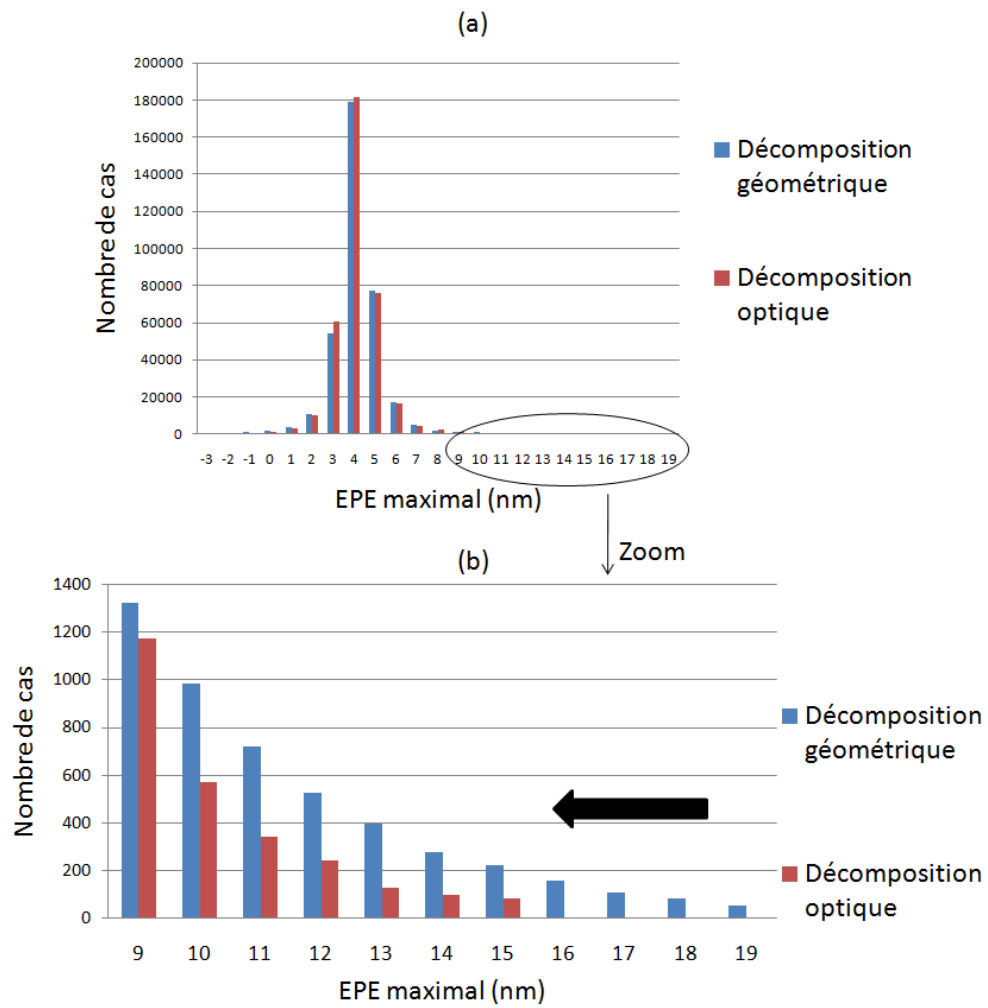


Figure 4.20. a) Histogrammes comparant le nombre de cas de l'EPE maximal pour les décompositions géométrique et optique, b) Zoom sur les grandes valeurs d'EPE maximal montrant un gain de 3nm avec la décomposition optique comparé à la décomposition géométrique

## 4.5. Conclusion

Nous avons développé une nouvelle méthode de décomposition (décomposition optique) dont le principe a été présenté en chapitre 3 et l'application au niveau contacts a été montrée dans ce chapitre. Cette décomposition innovatrice tient compte en plus du pas critique, des limitations optiques du système lithographique : la source, la longueur d'onde ou l'ouverture numérique. Les différentes étapes du flot de la décomposition optique ont été présentées dans ce chapitre. Les résultats montrés ont été obtenus dans le cas de la limite de résolution lithographique ( $NA=1.35$  et  $\lambda=193$  nm) avec une source partiellement cohérente.

Les résultats de simulation de l'impression des contacts, du nœud technologique 22 nm, par décomposition optique donnent des performances lithographiques meilleures que celles obtenues avec la décomposition géométrique. En effet, la décomposition optique permet de réduire les risques de non impression et de pontage des contacts. Cette nouvelle méthode de décomposition offre aux lithographes une clé supplémentaire permettant de mieux contrôler le procédé de double impression.

Les résultats de la décomposition optique présentés dans cette thèse ont été obtenus pour une même source utilisée pour l'impression des deux masques générés. Cependant, la décomposition optique permet aussi d'utiliser deux sources différentes : une pour chaque masque d'exposition. Il suffit de définir pour chaque source ses régions limitées (si elles existent) puis d'appliquer toutes les étapes du flot de la décomposition optique comme il a été expliqué dans ce chapitre.

L'utilisation de deux sources différentes pour l'impression des circuits avancés (22nm et au-delà) est souvent rencontrée en pratique. Ceci est dû au fait que la génération des sources pour l'impression des nœuds avancés est réalisée par des outils de simulation appelés SMO (de l'anglais *Source Mask Co-Optimization*, cf. chapitre 1). Ces derniers optimisent une source pour l'impression d'une structure donnée et pas pour l'impression de la totalité du circuit.

Les structures utilisées pour la génération des sources utilisant SMO sont, généralement, les plus denses motifs du circuit à imprimer, c'est-à-dire des motifs de mémoire SRAM (de l'anglais *Static Random Access Memory*). Ces motifs sont d'abord décomposés en deux



masques. Les outils SMO génèrent pour chaque masque une source permettant d'imprimer la structure correspondante.

Cependant, une source optimisée pour l'impression d'une structure prédéfinie ne permet pas forcément une bonne impression des structures qui n'ont pas été définies lors de la génération de cette source. Sachant que dans un circuit, il existe, en plus des motifs de mémoires SRAM, des motifs de cellules de logique qui ont des géométries différentes de celles des SRAM. Il devient primordial que les sources utilisées pour l'impression du circuit total, optimisées pour l'impression de la SRAM, doivent aussi permettre une bonne impression des autres motifs du circuit. C'est là où se situe le succès de la décomposition optique qui permet d'optimiser l'affiliation des motifs à un des deux masques d'exposition en fonction des régions limitées de chaque source.

Toutefois, dans le cadre du développement final de la décomposition optique, il reste à définir le contraste minimal pour le niveau contacts d'un point de vue procédé. Ceci peut se faire en complétant ces résultats de simulations par des résultats d'impression du niveau contacts sur plaquette. Puis, à l'aide de modèles calibrés, les résultats sur plaquette peuvent être corrélés à une valeur de contraste minimal. Ainsi, le contraste minimal des contacts peut être lié à une valeur minimale de la surface de recouvrement. Cela permettrait de définir un seuil d'intensité qui permettra de définir les orientations limitées et non limitées sans faire d'étude statistique.

# **CONCLUSION GENERALE**

La lithographie optique actuelle atteint ses limites en termes de résolution et ce malgré toutes les techniques qui ont été développées pour pousser cette résolution au maximum possible. Les techniques de lithographie de nouvelles générations comme l'EUV ne sont pas encore mature pour répondre aux besoins industriels. Pour pouvoir rester dans la course vers la miniaturisation, il devient primordial de trouver une technique alternative permettant l'impression des circuits intégrés des nœuds technologiques avancés (22nm et en dessous). Actuellement, la seule technique permettant la réalisation de ces circuits avec un rendement industriel acceptable est la lithographie par double impression.

Nous avons vu que quelque soit le procédé de double impression choisi, celui-ci nécessite une décomposition du dessin original du circuit en deux masques d'exposition. Cette décomposition, que nous avons appelée décomposition géométrique, est basée sur la règle de l'espacement ou du pas critique. Elle permet de générer deux masques sur lesquels les pas des motifs sont tous supérieurs au pas critique. Les travaux de cette thèse ont été réalisés dans le cadre de la décomposition pour la double impression. Le but était de développer une méthode de décomposition astucieuse permettant d'améliorer l'impression des deux masques lors du procédé de double impression.

Nous avons développé une nouvelle méthode, dite « décomposition optique », permettant de combler quelques lacunes liées à la décomposition géométrique. La décomposition optique tient compte en plus du pas critique des limitations optiques du système lithographique. La théorie de la décomposition optique repose sur le phénomène de diffraction, principale cause de la formation d'image dans un système lithographique. Plus précisément, il s'agit d'analyser l'interaction, dans la pupille du scanner, des ordres de diffraction dans le but de calculer la surface de recouvrement des premiers ordres de diffraction avec la pupille. Cette surface de recouvrement est responsable de la formation de l'image aérienne formée au niveau de la plaquette. Nous avons présenté le détail de la méthode de calcul de la surface de recouvrement qui dépend du pas du réseau et des paramètres optiques du système lithographique. Le calcul de la surface de recouvrement permet de détecter d'une part les pas critiques qui ne permettent pas une formation de l'image des motifs et d'autre part, les orientations limitées entre les motifs qui risquent de limiter le contraste de l'image aérienne. Outre le fait que cette méthode permet d'avoir une information sur le contraste, l'avantage de celle-ci est qu'elle permet aussi de gagner du temps.

En effet, au lieu de faire des simulations de contraste sur tout le masque, opération qui peut prendre un temps considérable, cette méthode est basée uniquement sur l'analyse des structures denses et périodiques présentes sur le masque.

De plus, cette méthode est très maniable car elle permet de considérer n'importe quelles valeurs optiques du système lithographique (la longueur d'onde, l'ouverture numérique et le pas de réseau) et n'importe quel type de sources utilisées dans l'industrie de la microélectronique (conventionnelle, hors axes ou pixelisées). Elle permet aussi de considérer deux sources différentes : une pour chaque masque d'exposition.

Nous avons appliqué cette méthode de calcul au niveau contacts d'un circuit de logique du nœud 22nm développant un nouveau flot de décomposition permettant d'affilier des contacts à un masque ou à un autre en se basant sur les orientations limitées. Le but de ce nouveau flot de décomposition est d'optimiser l'affiliation des contacts à un des deux masques dans le but d'augmenter, au final, le contraste des deux masques générés.

En termes de performances, les résultats de simulation de l'impression des contacts, du nœud technologique 22 nm, par décomposition optique donnent des performances lithographiques meilleures que celles obtenues avec la décomposition géométrique. En effet, la décomposition optique permet de réduire les risques de non impression et les risques de pontage des contacts offrant ainsi aux lithographes une clé supplémentaire permettant de mieux contrôler le procédé de double impression.

### **Les perspectives**

Bien que la méthode de décomposition optique comme elle a été développée dans cette thèse montre des résultats satisfaisants, il serait intéressant de la compléter sur au moins trois points. Le premier point consiste à redéfinir l'intensité des ordres de diffraction de manière plus rigoureuse tenant compte du facteur de transmission du masque qui dans notre cas a été considéré comme un masque binaire et du rapport cyclique (rapport entre la dimension des motifs et leurs pas) qui a été considéré à 0.5.

Le deuxième point à améliorer consiste à généraliser la normalisation de la surface de recouvrement en considérant une normalisation par un paramètre qui reste « invariant » pour pouvoir comparer les résultats de cette méthode appliqués à différentes sources lumineuses.

Dans notre cas, la normalisation a été faite par rapport à la source (ordre 0) et toutes les comparaisons des surfaces de recouvrement ont été réalisées pour la même source. Dans ce cas, le choix de la normalisation est correct. Cependant, pour pouvoir comparer les surfaces de recouvrement de différentes sources, il serait judicieux de normaliser par une « constante » comme par exemple la surface de la pupille.

Le troisième point consiste à définir le contraste minimal des contacts d'un point de vue procédé. Ceci peut se faire en complétant les résultats de simulations présentés dans cette thèse par des résultats d'impression des contacts sur plaquette. Puis, à l'aide de modèles calibrés, les résultats sur plaquette peuvent être corrélés à une valeur de contraste minimal. Ainsi, le contraste minimal des contacts peut être lié directement à une valeur minimale de la surface de recouvrement. Cela permet de définir un seuil d'intensité afin de déterminer les orientations limitées et non limitées directement à partir de la variation de la surface de recouvrement en fonction des orientations dans le réseau.

# **ANNEXE 1**

## Evolution des interactions en fonction des paramètres de l'illumination

Dans le chapitre 3, nous avons décrit, pour une illumination conventionnelle, l'évolution des interactions en fonction du pas du réseau, de la longueur d'onde, de l'ouverture numérique et de la cohérence partielle. Il est aussi possible de prédire l'évolution des interactions en fonction des mêmes paramètres pour les illuminations annulaires et quadripolaires.

Si  $S$  est la surface des ordres  $\pm 1$  qui participent à la formation d'image (la surface  $S$  est normalisée par rapport à la surface de la source), alors cette surface évolue selon l'illumination utilisée comme ceci :

Pour une illumination annulaire:

- $p \leq \frac{\lambda}{NA(1 + \sigma_{\text{ext}})}$  : pas d'interaction (seule la source (l'ordre 0) est captée par la pupille) :  $S=0$
- $\frac{\lambda}{NA(1 + \sigma_{\text{ext}})} < p \leq \frac{\lambda}{NA\sqrt{1 - \sigma_{\text{in}}^2}}$  : interaction à 2 ondes + ordre 0. La surface des interactions à deux ordres augmente et celle des ordres 0 diminue :  $0 < S < 1$ .
- $\frac{\lambda}{NA\sqrt{1 - \sigma_{\text{in}}^2}} < p \leq \frac{\lambda}{NA\sqrt{1 - \sigma_{\text{ext}}^2}}$  : Dans ce cas, les interactions à 3 ondes commencent à apparaître. interaction à 2 et 3 ondes + ordre 0. La surface des interactions à deux ordres diminuent alors que celle des interactions à trois ordres augmente. De plus, la surface de l'ordre 0 diminue :  $0 < S < 1$ .
- $p \geq \frac{\lambda}{NA(1 - \sigma_{\text{ext}})}$  : interaction à 3 ondes ou plus,  $S=1$ .

Avec  $\sigma_{\text{in}}$  et  $\sigma_{\text{ext}}$  respectivement le rayon interne et le rayon externe d'une illumination annulaire,  $\lambda$  la longueur d'onde,  $NA$  l'ouverture numérique et  $p$  le pas du réseau.

Pour une illumination quadripolaire :

$$- \quad p \leq \frac{\lambda / NA}{\sqrt{(1+\sigma_r)^2 - \frac{\sigma_q^2}{2}} + \frac{\sigma_q}{\sqrt{2}}} : \text{pas d'interaction (seul la source (les ordres 0) est captée par}$$

la pupille) :  $S=0$ .

$$- \quad \frac{\lambda / NA}{\sqrt{(1+\sigma_r)^2 - \frac{\sigma_q^2}{2}} + \frac{\sigma_q}{\sqrt{2}}} < p \leq \frac{\lambda / NA}{\sqrt{(1+\sigma_r)^2 - \frac{\sigma_q^2}{2}} - \frac{\sigma_q}{\sqrt{2}}} : \text{interaction à 2 ondes + ordre 0. La}$$

surface des interactions à deux ordres augmente et celle des ordres 0 diminue.  $0 < S < 1$

$$- \quad \frac{\lambda / NA}{\sqrt{(1+\sigma_r)^2 - \frac{\sigma_q^2}{2}} - \frac{\sigma_q}{\sqrt{2}}} < p \leq \frac{\lambda / NA}{\sqrt{(1-\sigma_r)^2 - \frac{\sigma_q^2}{2}} - \frac{\sigma_q}{\sqrt{2}}} : \text{Dans ce cas, les interactions à 3 ondes}$$

commencent à apparaître. interaction à 2 et 3 ondes + ordre 0. La surface des interactions à deux ordres diminuent alors que celle des interactions à trois ordres augmente. De plus, la surface de l'ordre 0 diminue :  $0 < S < 1$ .

$$- \quad p \geq \frac{\lambda / NA}{\sqrt{(1-\sigma_r)^2 - \frac{\sigma_q^2}{2}} - \frac{\sigma_q}{\sqrt{2}}} : \text{interaction à 3 ondes ou plus, } S=1.$$

Avec  $\sigma_q$  la position du centre du pôle étant à  $45^\circ$  et  $\sigma_r$  son rayon,  $\lambda$  la longueur d'onde, NA l'ouverture numérique et  $p$  le pas du réseau.





## **ANNEXE 2**

## Méthode de calcul de la surface de recouvrement sous Matlab

```
% NB : on ne considere que 3 ordres
%Application pour les sources classiques"
%Pour le cas 1D
clear
close all
figure(1);
cla
box on;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
lambda=193; % en nm
NA=1.35;      % NA
sigma_in=0.4; % sigma interieur
sigma_out=0.7; % sigma exterieur
pitch=100;    % en nm
opening_angle = 40;
rotation_angle = 45;
illum_list = {'conventional'; 'annular'; 'quasar'; 'cquad' };
illum = illum_list{4};
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
theta = linspace(0,1.*2*pi,360)';
xpupil=[]; ypupil=[];
xpupil(:,1) = NA*cos(theta);
ypupil(:,1) = NA*sin(theta);

xillum=[]; yillum=[];
N1=50; N2=360;

case strcmpi(illum,'cquad')
    rotation_angle=0;
    i1 = (rotation_angle-opening_angle/2)*pi/180;
    i2 = (rotation_angle+opening_angle/2)*pi/180;
    theta = linspace(i1,i2,round(abs(i2-i1)/(2*pi)*N2))';
    xillum(:,1) = [sigma_in*cos(theta); ...

linspace(sigma_in*cos(theta(end)),sigma_out*cos(theta(end)),N1)'; ...
    sigma_out*cos(theta(end:-1:1))]; ...
    linspace(sigma_out*cos(theta(1)),sigma_in*cos(theta(1)),N1)'];
    yillum(:,1) = [sigma_in*sin(theta); ...

linspace(sigma_in*sin(theta(end)),sigma_out*sin(theta(end)),N1)'; ...
    sigma_out*sin(theta(end:-1:1))]; ...
    linspace(sigma_out*sin(theta(1)),sigma_in*sin(theta(1)),N1)'];
    xillum(:,2) = [-sigma_in*cos(theta); ...
    linspace(-sigma_in*cos(theta(end)),-
sigma_out*cos(theta(end)),N1)'; ...
    -sigma_out*cos(theta(end:-1:1))]; ...
    linspace(-sigma_out*cos(theta(1)),-
sigma_in*cos(theta(1)),N1)'];
```

```

yillum(:,2) = [sigma_in*sin(theta); ...

linspace(sigma_in*sin(theta(end)),sigma_out*sin(theta(end)),N1)'; ...
    sigma_out*sin(theta(end:-1:1)); ...
    linspace(sigma_out*sin(theta(1)),sigma_in*sin(theta(1)),N1)'];
xillum(:,3) = [sigma_in*sin(theta); ...

linspace(sigma_in*sin(theta(end)),sigma_out*sin(theta(end)),N1)'; ...
    sigma_out*sin(theta(end:-1:1)); ...
    linspace(sigma_out*sin(theta(1)),sigma_in*sin(theta(1)),N1)'];
yillum(:,3) = [sigma_in*cos(theta); ...

linspace(sigma_in*cos(theta(end)),sigma_out*cos(theta(end)),N1)'; ...
    sigma_out*cos(theta(end:-1:1)); ...
    linspace(sigma_out*cos(theta(1)),sigma_in*cos(theta(1)),N1)'];
xillum(:,4) = [sigma_in*sin(theta); ...

linspace(sigma_in*sin(theta(end)),sigma_out*sin(theta(end)),N1)'; ...
    sigma_out*sin(theta(end:-1:1)); ...
    linspace(sigma_out*sin(theta(1)),sigma_in*sin(theta(1)),N1)'];
yillum(:,4) = [-sigma_in*cos(theta); ...
    linspace(-sigma_in*cos(theta(end)),-
sigma_out*cos(theta(end)),N1)'; ...
    -sigma_out*cos(theta(end:-1:1)); ...
    linspace(-sigma_out*cos(theta(1)),-
sigma_in*cos(theta(1)),N1)'];

axis([-5 5 -NA*2.1 NA*2.1])
pp = patch(xpupil,ypupil,'k','EdgeAlpha',1,'FaceAlpha',0,'LineStyle','-
','LineWidth',1.5);
hold on;
nb_poles=size(xillum,2);
% ordre 0
for i=1:nb_poles
    p0(i)=patch(xillum(:,i),yillum(:,i),'c','EdgeAlpha',0,'FaceAlpha',0.5);
end

% ordre +1
for i=1:nb_poles

p1(i)=patch(xillum(:,i)+lambda/pitch,yillum(:,i),'c','EdgeAlpha',0,'FaceAlp
ha',0.5);
end

% ordre -1
for i=1:nb_poles
    p2(i)=patch(xillum(:,i)-
lambda/pitch,yillum(:,i),'c','EdgeAlpha',0,'FaceAlpha',0.5);
end

daspect([1 1 1]); % normalisation de l'echelle de l'axe

%intersection entre la pupille et les ordres 1 et -1

```

```

x = []; y = [];
l=0; s=[]; A0=[]; A1=[];
dx = 0.02; dy=dx;
%0.025

for p=1:2 % parcourir les ordres -1 et +1
    for i=1:nb_poles
        if p==1
            x=xillum(:,i)+lambda/pitch;
            y=yillum(:,i);
        else
            x=xillum(:,i)-lambda/pitch;
            y=yillum(:,i);
        end
        in1 = inpolygon(x,y,xpupil,ypupil);
        in2 = inpolygon(xpupil,ypupil,x,y);
        xc = [xpupil(in2); x(in1)]; % vecteur in1 et vecteur in2 (contour)
        yc = [ypupil(in2); y(in1)];
        if p==1
            plot(xc,yc,'r.') %k

            end
        if p==2
            plot(xc,yc,'b.') %k

            end
        if ~isempty(xc)
            l=l+1;
            gx=(min(xc):dx:max(xc))';
            gy=(min(yc):dy:max(yc))';
            [X Y]= meshgrid(gx,gy);
            IN1 = inpolygon(X,Y,xpupil,ypupil); % partie de la grille dans
la pupille
            IN2 = inpolygon(X,Y,x,y); % partie de la grille dans le pole
            IN = (IN1 & IN2);
            xi = X(IN(:)); yi = Y(IN(:)); % (intersection)

            A1(l) = numel(xi)*dx*dy;
        end
    end
end
% calcul de l'aire de l'ordre 0 dans la pupille
gx=(min(xpupil):dx:max(xpupil))';
gy=(min(ypupil):dy:max(ypupil))';
[X Y]= meshgrid(gx,gy);
for i=1:nb_poles
    x=xillum(:,i);
    y=yillum(:,i);
    IN1 = inpolygon(X,Y,xpupil,ypupil);
    IN2 = inpolygon(X,Y,x,y);
    IN = (IN1 & IN2);
    xi = X(IN(:)); yi = Y(IN(:));

```

```

    A0(i) = numel(xi)*dx*dy; % aire de l'ordre 0 dans la pupille
end

disp(['Area of 0 order = ' num2str(sum(A0))])
disp(['Area of +/-1 orders = ' num2str(sum(A1))])
disp(['Contrast = ' num2str(sum(A1/2)/sum(A0))])

A0_percent = sum(A0)/(sum(A0)+sum(A1))*100;
A1_percent = sum(A1)/(sum(A0)+sum(A1))*100;
Ax = 0:1;

% Pour le cas 2D
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
lambda=193; % en nm
NA=1.35;      % NA
sigma_in=0.6; % sigma interieur
sigma_out=0.8; % sigma exterieur
%pitch=[ 90 95 100 105 110 115 120 125 130 135 140 145 150 155 160] ; % en
nm
pitch=100;
opening_angle = 20;
rotation_angle = 45;
illum_list = {'conventional'; 'annular'; 'quasar'; 'cquad' };
illum = illum_list{4};
rot_reseau = [ (0*pi/180) (5*pi/180) (10*pi/180) (15*pi/180) (20*pi/180)
(25*pi/180) (30*pi/180) (35*pi/180) (40*pi/180) (45*pi/180)] ;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
theta = linspace(0,2.*pi,360);
xpupil=[]; ypupil=[];
xpupil(:,1) = NA*cos(theta);
ypupil(:,1) = NA*sin(theta);

xillum=[]; yillum=[];
N1=360; N2=360;

case strcmpi(illum,'cquad')
    rotation_angle=0;
    i1 = (rotation_angle-opening_angle/2)*pi/180;
    i2 = (rotation_angle+opening_angle/2)*pi/180;
    theta = linspace(i1,i2,round(abs(i2-i1)/(2*pi)*N2))';

    xillum(:,1) = [sigma_in*cos(theta); ...

linspace(sigma_in*cos(theta(end)),sigma_out*cos(theta(end)),N1)'; ...
    sigma_out*cos(theta(end:-1:1)); ...
    linspace(sigma_out*cos(theta(1)),sigma_in*cos(theta(1)),N1)'];
    yillum(:,1) = [sigma_in*sin(theta); ...

linspace(sigma_in*sin(theta(end)),sigma_out*sin(theta(end)),N1)'; ...
    sigma_out*sin(theta(end:-1:1)); ...
    linspace(sigma_out*sin(theta(1)),sigma_in*sin(theta(1)),N1)'];

```

```

        xillum(:,2) = [-sigma_in*cos(theta); ...
            linspace(-sigma_in*cos(theta(end)), -
sigma_out*cos(theta(end)), N1)']; ...
        -sigma_out*cos(theta(end:-1:1)); ...
        linspace(-sigma_out*cos(theta(1)), -
sigma_in*cos(theta(1)), N1)'];
        yillum(:,2) = [sigma_in*sin(theta); ...

linspace(sigma_in*sin(theta(end)), sigma_out*sin(theta(end)), N1)'; ...
        sigma_out*sin(theta(end:-1:1)); ...
        linspace(sigma_out*sin(theta(1)), sigma_in*sin(theta(1)), N1)'];
        xillum(:,3) = [sigma_in*sin(theta); ...

linspace(sigma_in*sin(theta(end)), sigma_out*sin(theta(end)), N1)'; ...
        sigma_out*sin(theta(end:-1:1)); ...
        linspace(sigma_out*sin(theta(1)), sigma_in*sin(theta(1)), N1)'];
        yillum(:,3) = [sigma_in*cos(theta); ...

linspace(sigma_in*cos(theta(end)), sigma_out*cos(theta(end)), N1)'; ...
        sigma_out*cos(theta(end:-1:1)); ...
        linspace(sigma_out*cos(theta(1)), sigma_in*cos(theta(1)), N1)'];
        xillum(:,4) = [sigma_in*sin(theta); ...

linspace(sigma_in*sin(theta(end)), sigma_out*sin(theta(end)), N1)'; ...
        sigma_out*sin(theta(end:-1:1)); ...
        linspace(sigma_out*sin(theta(1)), sigma_in*sin(theta(1)), N1)'];
        yillum(:,4) = [-sigma_in*cos(theta); ...
            linspace(-sigma_in*cos(theta(end)), -
sigma_out*cos(theta(end)), N1)'; ...
        -sigma_out*cos(theta(end:-1:1)); ...
        linspace(-sigma_out*cos(theta(1)), -
sigma_in*cos(theta(1)), N1)'];

axis([-5 5 -NA*3.3 NA*3.3])
pp = patch(xpupil, ypupil, 'y', 'EdgeAlpha', 1, 'FaceAlpha', 0, 'LineStyle', '-
', 'LineWidth', 1.5);
hold on;
nb_poles=size(xillum,2);

% ordre 00
for i=1:nb_poles

p00(i)=patch(xillum(:,i), yillum(:,i), 'k', 'EdgeAlpha', 0, 'FaceAlpha', 0.25);

end
x = []; y = []; xi = []; yi = [];
A0l=[]; dx = 0.05; dy=dx; A0=0;

%%%%%%%%%% calcul de l'aire de l'ordre 0 dans la pupille
gx=(min(xpupil):dx:max(xpupil))';
gy=(min(ypupil):dy:max(ypupil))';
[X Y]= meshgrid(gx,gy);
for i=1:nb_poles

```

```

x=xillum(:,i);
y=yillum(:,i);
IN1 = inpolygon(X,Y,xpupil,ypupil);
IN2 = inpolygon(X,Y,x,y);
IN = (IN1 & IN2);
xi = X(IN(:)); yi = Y(IN(:));
A01(i) = numel(xi)*dx*dy; % aire de l'ordre 0 dans la pupille

end
A0 =sum(A01);

%%%%%%%%%%%%% boucle sur pitch %%%%%%%%%%%%%
for kk=1:length(pitch)

    %%%%%%%%%%%%%% boucle sur l angle de rotation %%%%%%%%%%%%%
    for k=1:length(rot_reseau)
        cosx=cos(rot_reseau(k));
        siny=sin(rot_reseau(k));

        cosx45m=cos((pi/4)-(rot_reseau(k)));
        siny45m=sin((pi/4)-(rot_reseau(k)));

        cosx45=cos((pi/4)+(rot_reseau(k)));
        siny45=sin((pi/4)+(rot_reseau(k)));

        %ordre 01 --> with 1 from ordre 0 en Y0
        for i=1:nb_poles
            p01(i)=patch(xillum(:,i)-
                ((lambda/pitch(kk))*(siny)),yillum(:,i)+((lambda/pitch(kk))*(cosx)),'k.','EdgeAlpha',0,'FaceAlpha',0.25);
        end

        %ordre 0M1 --> with 1 from ordre 0 en Y0
        for i=1:nb_poles

p0m1(i)=patch(xillum(:,i)+((lambda/pitch(kk))*(siny)),yillum(:,i)-
                ((lambda/pitch(kk))*(cosx)),'k.','EdgeAlpha',0,'FaceAlpha',0.25);
        end

        % ordre +10 --> with 3 en X0
        for i=1:nb_poles

p10(i)=patch(xillum(:,i)+((lambda/pitch(kk))*cosx),yillum(:,i)+((lambda/
pitch(kk))*siny),'k.','EdgeAlpha',0,'FaceAlpha',0.25);
        end

        % ordre -10 --> with 3 en X0
        for i=1:nb_poles
            pm10(i)=patch(xillum(:,i)-
                ((lambda/pitch(kk))*cosx),yillum(:,i)-
                ((lambda/pitch(kk))*siny),'k.','EdgeAlpha',0,'FaceAlpha',0.25);
        end
    end
end

```



```

end

% ordre +11 --> with 2 en diag
for i=1:nb_poles
    p11(i)=patch(xillum(:,i)+((lambda/pitch(kk))*(1-
(siny/cosx))),yillum(:,i)+((lambda/pitch(kk))*(1+siny)),'k.','EdgeAlpha',0,
'FaceAlpha',0.25);
end

%ordre -1-1 --> with 2 en diag
for i=1:nb_poles
    pm1m1(i)=patch(xillum(:,i)-((lambda/pitch(kk))*(1-
(siny/cosx))),yillum(:,i)-
((lambda/pitch(kk))*(1+siny)),'k.','EdgeAlpha',0,'FaceAlpha',0.25);
end

% ordre +1M1 --> with Amdiag
for i=1:nb_poles

p1m1(i)=patch(xillum(:,i)+((lambda/pitch(kk))*(1+(siny/cosx))),yillum(:,i)+
((lambda/pitch(kk))*(-
1+((siny/cosx)*(siny/cosx)))), 'k','EdgeAlpha',0,'FaceAlpha',0.25);
end

% ordre -11 --> with Amdiag
for i=1:nb_poles
    pm11(i)= patch(xillum(:,i)-
((lambda/pitch(kk))*(1+(siny/cosx))),yillum(:,i)+((lambda/pitch(kk))*(1-
((siny/cosx)*(siny/cosx))),'k','EdgeAlpha',0,'FaceAlpha',0.25);
end

daspect([1 1 1]); % normalisation de l'echelle de l'axe

%intersection entre la pupille et les ordres p10 et p-10 en X
x1 = []; y1 = []; x2 = []; y2 = []; x3 = []; y3 = []; x4 = []; y4 =
[]; xc = []; yc = [];
l=0; A1x=[];Ax2=[]; Adia2=[];A1y=[];Ay2=[];A2=[];A3=[];A4=[];
Amdiag2=[];

x1=get(pp,'Xdata');
y1=get(pp,'Ydata');

for p=1:2
    for i=1:size(xillum,2) %nombre de poles ds l illum
        if p==1
            x2=get(p10(i),'Xdata');
            y2=get(p10(i),'Ydata');
        else
            x2=get(pm10(i),'Xdata');
            y2=get(pm10(i),'Ydata');
        end
    end
end

```

```

end
in1 = inpolygon(x2,y2,x1,y1);
in2 = inpolygon(x1,y1,x2,y2);
xc = [x1(in2); x2(in1)];
yc = [y1(in2); y2(in1)];
if p==1
    plot(xc,yc,'r.')
end
if p==2
    plot(xc,yc,'r.') %b

end
if ~isempty(xc)
    l=l+1;
    gx=(min(xc):dx:max(xc))';
    gy=(min(yc):dy:max(yc))';
    [X Y]= meshgrid(gx,gy);
    IN1 = inpolygon(X,Y,x1,y1);
    IN2 = inpolygon(X,Y,x2,y2);
    IN = (IN1 & IN2);
    x = X(IN(:)); y = Y(IN(:));
    A1x(l) = numel(x)*dx*dy;
end

end
Ax2(k) = sum(A1x)/A0;

end
Ax2 =(sum(Ax2))

%intersection entre la pupille et les ordres p11 et p-1-1 en diag

for p=1:2
    for i=1:size(xillum,2) %nombre de poles ds l illum
        if p==1
            x22=get(p11(i),'Xdata');
            y22=get(p11(i),'Ydata');
        else
            x22=get(p1m1(i),'Xdata');
            y22=get(p1m1(i),'Ydata');
        end
        in12 = inpolygon(x22,y22,x1,y1);
        in22 = inpolygon(x1,y1,x22,y22);
        xc2 = [x1(in22); x22(in12)];
        yc2 = [y1(in22); y22(in12)];
        if p==1
            plot(xc2,yc2,'r.') %y
        end
        if p==2
            plot(xc2,yc2,'r.') %m
        end
    end
end

```

```

end
    if ~isempty(xc2)
        l=l+1;
        gx2=(min(xc2):dx:max(xc2))';
        gy2=(min(y2):dy:max(y2))';
        [X2 Y2]= meshgrid(gx2,gy2);
        IN12 = inpolygon(X2,Y2,x1,y1);
        IN22 = inpolygon(X2,Y2,x22,y22);
        IN2 = (IN12 & IN22);
        x2 = X2(IN2(:)); y2 = Y2(IN2(:));

        A2(l) = numel(x2)*dx*dy;
    end

end

Adiag2(k) = sum(A2)/A0;
end
Adiag2=sum(Adiag2)

%intersection entre la pupille et les ordres plm1 et p-11 en diag

for p=1:2
    for i=1:size(xillum,2) %nombre de poles ds l illum
        if p==1
            x24=get(plm1(i),'Xdata');
            y24=get(plm1(i),'Ydata');
        else
            x24=get(pm11(i),'Xdata');
            y24=get(pm11(i),'Ydata');
        end
        in14 = inpolygon(x24,y24,x1,y1);
        in24 = inpolygon(x1,y1,x24,y24);
        xc4 = [x1(in24); x24(in14)];
        yc4 = [y1(in24); y24(in14)];
        if p==1
            plot(xc4,yc4,'r.') %c
        end
        if p==2
            plot(xc4,yc4,'r.') %w
        end
        if ~isempty(xc2)
            l=l+1;
            gx4=(min(xc4):dx:max(xc4))';
            gy4=(min(yc4):dy:max(yc4))';
            [X4 Y4]= meshgrid(gx4,gy4);
            IN14 = inpolygon(X4,Y4,x1,y1);
            IN24 = inpolygon(X4,Y4,x24,y24);
            IN4 = (IN14 & IN24);

```

```

        x4 = X2(IN4(:)); y4 = Y2(IN4(:));

        A4(1) = numel(x4)*dx*dy;
    end

    end

    Amdia2(k) = sum(A4)/A0;
end
Amdia2=sum(Amdia2)

%intersection entre la pupille et les ordres p01 et p0-1 en Y

for p=1:2
    for i=1:size(xillum,2) %nombre de poles ds l illum
        if p==1
            x23=get(p01(i),'Xdata');
            y23=get(p01(i),'Ydata');
        else
            x23=get(p0m1(i),'Xdata');
            y23=get(p0m1(i),'Ydata');
        end
        in13 = inpolygon(x23,y23,x1,y1);
        in23 = inpolygon(x1,y1,x23,y23);
        xc3 = [x1(in23); x23(in13)];
        yc3 = [y1(in23); y23(in13)];
        if p==1
            plot(xc3,yc3,'r.') %g
        end
        if p==2
            plot(xc3,yc3,'r.') %m
        end
        if ~isempty(xc3)
            l=l+1;
            gx3=(min(xc3):dx:max(xc3))';
            gy3=(min(yc3):dy:max(yc3))';
            [X3 Y3]= meshgrid(gx3,gy3);
            IN13 = inpolygon(X3,Y3,x1,y1);
            IN23 = inpolygon(X3,Y3,x23,y23);
            IN3 = (IN13 & IN23);
            x3 = X3(IN3(:)); y3 = Y3(IN3(:));

            A3(1) = numel(x3)*dx*dy;
        end

    end

    Ay2(k) = sum(A3)/A0;
end
Ay2=sum(Ay2)

end

```

```

total_overlap_area2 (kk,k) = Ay2 + Ax2 + Adia2 + Amdia2

end

%Application pour les sources pixelisées
close all
clc
clear source_seuil;
%imread('/prj/opc/all/users/zn9/diffraction/matlab/1Dlinespace/smo-dipole-
P80.src');pour lire et matricer un gds

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
lambda=193; % en nm
NA = 1.85;      % NA tout est X100 ds le script
pitch=80; % en nm
direction = 0; % 0 pour x et 1 pour y
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%ordres=[-2 -1 0 1 2]; %ordres de diffraction
ordres=[-1 0 1];

%couleurs
colors = {'red'; 'green'; 'blue'; 'cyan'; 'yellow'; 'magenta'; [0.31 0.31
0.31]; ...
          [0.749 0.749 0]; [0.6 0.2 0]; [0 0.75 0.75]; [0.17 0.51 0.34]; [0.04
0.52 0.78] };

% lire le fichier de la source

smo_contact_sram20=dlmread('smo_contact_sram20.src','\t',5,0);
S2_s=reshape(smo_contact_sram20(:,3),201,201)';

S2_s(S2_s<0.0)=0;

% coordonnées x et y de la source qui est une matrice de 201x201 points
x = linspace(-NA, NA, size(S2_s, 2))*pitch/lambda;
y = linspace(-NA, NA, size(S2_s, 1))*pitch/lambda;

% j'utilise un échantillonnage plus fin de la source pour le calcul de
l'aire
N = 500; % nombre de points
xs = linspace(-NA, NA, N)*pitch/lambda;
ys = linspace(-NA, NA, N)*pitch/lambda;
dx = xs(2)-xs(1);
dy = ys(2)-ys(1);

theta = 0:pi/50:2*pi;
axis equal

if direction==0
    x0 = (xs(1)+min(ordres):dx:xs(end)+max(ordres))';

```

```

        y0 = ys;
else
    x0 = xs;
    y0 = (ys(1)+min(ordres):dy:ys(end)+max(ordres))';
end
s = struct;
for k=1:length(ordres)
    o = ordres(k);
    s(k).ordre = o;
    s(k).data = sourcemap(x,y,S2_s, x0, y0, o, direction);
end

s0 = sourcemap(x,y,S2_s, x0, y0, 0, direction);

figure(1)
h11=subplot(2-direction,2-(1-direction),1);hold on; box on;
h12=subplot(2-direction,2-(1-direction),2);hold on; box on;
figure(2)
h21=subplot(2-direction,2-(1-direction),1); hold on; box on;
h22=subplot(2-direction,2-(1-direction),2); hold on; box on;

hold on; box on;
for k=1:length(ordres)
    mesh(h11, x0, y0, s(k).data)
end
legend(h11, strcat({'Ordre '},strread(num2str(ordres), '%s')), 'Location',
'NorthEastOutside');
fill3(sin(theta)*NA*pitch/lambda,cos(theta)*NA*pitch/lambda,
ones(size(theta)), ones(size(theta)), 'EdgeColor', 'w', 'FaceColor', 'w',
'FaceAlpha', 0, 'Parent', h11)
l = legend(h11);
leg = get(l, 'String');
leg{end+1} = 'Pupille';
legend(h11, leg, 'Location', 'NorthEastOutside');
axis(h11, [min(x0) max(x0) min(y0) max(y0)])
daspect(h11, ones(1,3))
view(h11, 2)
if direction==0
    set(h11, 'XTick', ordres)
else
    set(h11, 'YTick', ordres)
end
xlabel(h11, 'Ordre n_x')
ylabel(h11, 'Ordre n_y')

for k=1:length(ordres)
    m=mod(k,length(colors));
    if m==0, m=length(colors); end
    color = colors{m};
    contour(h21, x0, y0, s(k).data, [0.05 0.05] , 'Color', color)
end

```

```

legend(h21, strcat({'Ordre '},strread(num2str(ordres), '%s')), 'Location',
'NorthEastOutside');
fill3(sin(theta)*NA/lambda*pitch,cos(theta)*NA/lambda*pitch,
ones(size(theta)), ones(size(theta)), 'EdgeColor', 'k', 'FaceColor', 'w',
'FaceAlpha', 0, 'Parent', h21)
l = legend(h21);
leg = get(l , 'String');
leg{end+1} = 'Pupille';
legend(h21, leg, 'Location', 'NorthEastOutside');
axis(h21, [min(x0) max(x0) min(y0) max(y0)])
daspect(h21, ones(1,3))
view(h21, 2)
if direction==0
    set(h21, 'XTick', ordres)
else
    set(h21, 'YTick', ordres)
end
xlabel(h21, 'Ordre n_x')
ylabel(h21, 'Ordre n_y')

%% recouvrement

for i=1:length(ordres)
    mesh(h12, x0, y0, s(i).data)
    %pause
end
legend(h12, strcat({'Ordre '},strread(num2str(ordres), '%s')), 'Location',
'NorthEastOutside');
fill3(sin(theta)*NA/lambda*pitch,cos(theta)*NA/lambda*pitch,
ones(size(theta)), ones(size(theta)), 'EdgeColor', 'w', 'FaceColor', 'w',
'FaceAlpha', 0, 'Parent', h12)
l = legend(h12);
leg = get(l , 'String');
leg{end+1} = 'Pupille';
legend(h12, leg, 'Location', 'NorthEastOutside');
axis(h12, [min(x0) max(x0) min(y0) max(y0)])
daspect(h12, ones(1,3))
view(h12, 2)
if direction==0
    set(h12, 'XTick', ordres)
else
    set(h12, 'YTick', ordres)
end
xlabel(h12, 'Ordre n_x')
ylabel(h12, 'Ordre n_y')

for i=1:length(ordres)
    m=mod(i,length(colors));
    if m==0, m=length(colors); end
    color = colors{m};

```

```

        contour(h22, x0, y0, s(i).data, [0.05 0.05], 'Color', color)
    end
    legend(h22, strcat({'Ordre '},strread(num2str(ordres), '%s')), 'Location',
    'NorthEastOutside');
    fill3(sin(theta)*NA/lambda*pitch,cos(theta)*NA/lambda*pitch,
    ones(size(theta)), ones(size(theta)), 'EdgeColor', 'k', 'FaceColor', 'w',
    'FaceAlpha', 0, 'Parent', h22)
    l = legend(h22);
    leg = get(l, 'String');
    leg{end+1} = 'Pupille';
    legend(h22, leg, 'Location', 'NorthEastOutside');
    axis(h22, [min(x0) max(x0) min(y0) max(y0)])
    daspect(h22, ones(1,3))
    view(h22, 2)
    if direction==0
        set(h22, 'XTick', ordres)
    else
        set(h22, 'YTick', ordres)
    end
    xlabel(h22, 'Ordre n_x')
    ylabel(h22, 'Ordre n_y')

% l'aire est donn???e par sc dans la pupille
[X0 Y0] = meshgrid(x0, y0);
s_pupil = struct;
aire = [];
for i=1:length(ordres)
    s_pupil(i).ordre = s(i).ordre;
    % ici soit on consid???re l'intensit??? comme poids d'interaction, soit
on
    % met les poids ??? 1 partout
    s_pupil(i).data = s(i).data; % les poids sont donn???s par
l'intensit??? <- plus juste pour moi
    %s_pupil(i).data = ones(size(s(i).data));
    s_pupil(i).data(sqrt(X0.^2+Y0.^2)>NA*pitch/lambda)=0;
    aire(i) = sum(s_pupil(i).data(:))/sum(s0(:));
    fprintf('L'aire de recouvrement de l'ordre %d avec la pupille est
???gal ??? %1.2f%%\n', s(i).ordre, aire(i)*100)
end
l=legend(h22);
leg=get(l, 'String');
for i=1:length(ordres)
    if aire(i)~=0
        m=mod(i,length(colors));
        if m==0, m=length(colors); end
        color = colors{m};
        contour(h22, x0, y0, s_pupil(i).data, [0.05 0.05], 'Color',color,
'LineStyle', '-', 'LineWidth',2)
        leg{end+1}=[ 'Ordre ' num2str(s_pupil(i).ordre)];
    end
end
legend(h22, leg, 'Location', 'NorthEastOutside')
if direction==0

```



```

        set(h22, 'XTick', ordres)
else
    set(h22, 'YTick', ordres)
end
xlabel(h22, 'Ordre n_x')
ylabel(h22, 'Ordre n_y')
end

function s0 = sourcemap(x,y,s, x0, y0, o, direction)
    [X, Y] = meshgrid(x+o*(1-direction),y+o*direction);
    [X0, Y0] = meshgrid(x0,y0);
    s0 = interp2(X,Y,s,X0,Y0);
    s0(isnan(s0))=0;
end

```

## **ANNEXE 3**

# LISTE DES PUBLICATIONS

## *1. « Resolving contact conflicts for double patterning split »*

N. ZEGGAOUI (STMicroelectronics – LTM/CNRS), V. Farys (STMicroelectronics), M. Besacier (LTM/CNRS), E. Yesilada (STMicroelectronics), F. Robert (STMicroelectronics), Y. Trouiller (CEA/LETI).

Publié dans les Proceedings SPIE *Photomask Technology* 2009, vol. 7488, 74882K.

Présentation Orale

## *2. « Optimization of double patterning split by analyzing the diffractive orders in the pupil plane »*

N. ZEGGAOUI (STMicroelectronics – LTM/CNRS), V. Farys (STMicroelectronics), M. Besacier (LTM/CNRS), E. Yesilada (STMicroelectronics), F. Robert (STMicroelectronics), Y. Trouiller (CEA/LETI).

Publié dans les Proceedings SPIE *Photomask Technology* 2010, vol. 7823, 78233Y.

Poster

## *3. « Improving double patterning flow by analyzing the diffractive orders in the pupil plane »*

N. ZEGGAOUI (STMicroelectronics – LTM/CNRS), V. Farys (STMicroelectronics), M. Besacier (LTM/CNRS), Q. Li (Mentor Graphics), E. Yesilada (STMicroelectronics), Y. Trouiller (CEA/LETI).

Publié dans les Proceedings SPIE *Advanced Lithography* 2011, vol. 7973, 79730M.

Présentation orale

#### **4. « *Enabling the 22-nm logic node with advanced RET solutions* »**

V. Farys (STMicroelectronics), J. Finders (ASML Technology), L. Depré (Brion Technology), V. Arnoux, (Brion Technology), N. ZEGGAOUI (STMicroelectronics – LTM/CNRS), C. Alleaume (STMicroelectronics), E. Yesilada (STMicroelectronics), Y. Trouiller (CEA/LETI), H. Y. Liu (Brion Technology).

Publié dans les Proceedings SPIE *Advanced Lithography* 2011, vol. 7973, 7970T.



# **BIBLIOGRAPHIE**

1. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_bipolaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor_bipolaire). *wikipedia*. [En ligne]
2. [http://www.radiomuseum.org/forumdata/upload/1ere partie Le transistor à pointes\\_RM.pdf](http://www.radiomuseum.org/forumdata/upload/1ere%20partie%20Le%20transistor%20%C3%A0%20pointes_RM.pdf). *Radiomuseum*. [En ligne]
3. **Kilby, J.S.** *Invention of the Integrated Circuit*. IEEE Transactions on Electron Devices, 1976, Vol. 23(7), 648-654,.
4. **Mathieu, H.** *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques*. 2004.
5. **Fagin, F.** *Insulated gate field effect transistor integrated circuits with silicon gates*. IEEE, Transaction on electron Device, 1969, Vol. 16, 236.
6. **GNT**. <http://www.generation-nt.com/intel-itanium-9300-processeur-serveur-actualite-958451.html>. *generation nouvelles technologies*. [En ligne] 9 Fevrier 2010.
7. **Moore, G.E.** *Gramming more Components onto Integrated Circuits*. Electronics, 1965.
8. ITRS. [En ligne] 2010. <http://www.itrs.net/>.
9. <http://www.itrs.net/>. ITRS. [En ligne] 2008.
10. **Mack, C.A.** *The end of the semiconductor industry as we know it*. Santa Clara, CA : Emerging Lithographic Technologies , 2003, Vol. VII.
11. **Babaud, L.** *Thèse: Développement et optimisation d'un procédé de gravure grille polysilicium pour les noeuds technologiques 45nm et 32nm*. Grenoble : l'institut polytechnique de Grenoble, 2010.
12. **Skotnicki, T.** *Transistor MOS et sa technologie de fabrication*. Technique de l'ingénieur.
13. **Sze, S.M.** *Physics of Semiconductor Devices*. New Yorck : John Wiley & Sons, 1981.
14. **Lee, T.H.** *The design of CMOS Radio-Frequency integrated circuits*. Cambridge university press, 2008.
15. **Broussous, L.** *HDR: Comportement en solution de nettoyage, des matériaux des interconnexions de circuits intégrés*. Grenoble : Université de Joseph Fourier , 2010.
16. [http://en.wikipedia.org/wiki/Physical\\_design\\_\(electronics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Physical_design_(electronics)). *Wikipedia*. [En ligne] 5 Mars 2011.
17. [http://en.wikipedia.org/wiki/integrated\\_circuit\\_layout](http://en.wikipedia.org/wiki/integrated_circuit_layout). *Wikipedia*. [En ligne] 7 Avril 2011.
18. **Galdin, S.** *Electronique ultime*. paris : Institut d'électronique fondamentale-Université deParis sud.
19. *Changing wafer size and the move to 300mm*. integrated circuit engineering corportation.
20. **Civera, D.** <http://www.presence-pc.com/actualite/wafer-450-mm-Intel-37885/>. *EETimes*. [En ligne] 14 01 2010.
21. **Lapedus, M.** *Debate rages over 450mm wafer fabs*. *Eetimes*. 2006.
22. **Thompson, L. F.** *Introduction to Microlithography*. ACS Symposium , 1983.
23. **Moreau, W. M.** *Semiconductor lithography: Principles, Practices and Materials*. Plenum Press, 1988.

24. **Lam, D. K.** <http://www.electroiq.com/articles/sst/2011/06/lithography-cost-of-ownership-considerations.html>. *The portal for Electronics Manufacturing*. [En ligne] 27 Juin 2011.
25. **Abbe, E.** *Beiträge zur Theorie des Mikroskops unter des Mikroskopischen Wahrnehmung*. Archiv. f. Mikroskopische Anat, 1873, Vol. 9.
26. **Mortini, B.** *Thèse: étude des résines photolithographiques positives 193nm à amplification chimique et mise au point de leurs conditions de procédé*. Grenoble : Université de Joseph Fourier, 2001.
27. **Rayleigh, L.** *Investigations in optics with special reference to the spectroscope*. 49, Phil. Mag. 1879, Vol. 8.
28. **Willemin, M.** *Quelque tests optiques de télescopes et de lunettes astronomiques*. Malvilliers : Séminaire SNA, 2005.
29. **Levinson, H.** *Principles of lithography*. Society of photo optical, 2005.
30. **Jhaveri, T.** *Enabling Technology Scaling with "In Production" Lithography Processes*. SPIE, 2008, Vol. 6924.
31. **Schellenberg, F.** *MEEF theory and practice*. SPIE BACUS, 1999, Vol. 3873.
32. **Soichi, O.** *Immersion lithography: its history, current status, and future prospects*. 7140(2), Saitama-Japon : SPIE, 2008, Vol. 7140. 0277-786X.
33. **You, J-H.** *Investigation of resolution enhancement by using interferometric immersion lithography with a Liord mirror*. 6, Journal of the Korean physical society, 2009, Vol. 54.
34. **Switkes, M.** *Immersion lithography: beyond the 65nm node with optics*. *Microlithography world*. 2003.
35. **Chang, C. Y.** *Watermarks defect formation and removal for immersion lithography*. SPIE, 2006, Vol. 6154.
36. **T, S Gau.** *Image characterization of bubbles in water for 193nm immersion lithography-far fields approach*. JM3, 2004, Vol. 3.
37. **Silverman, P. J.** *Equipment for the nanometric generation*. Orlando, USA : 29th conference on electron, Ion, Photon Beam Nano-Technology, 2005.
38. **N. Seong, H. Kang.** *Pattern displacement error under off axis illumination*. 6695-6697, Appi. Phys, 1998, Vol. 37.
39. **Horiuchi, T.** *Study of optimum annular illumination conditions by evaluating the resolution limit and pattern image contrast*. 12A, Appi; Phys, 1996, Vol. 35.
40. [http://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_proximity\\_correction](http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_proximity_correction). wikipedia. [En ligne]
41. **Cobb, N.** *Thèse: Fast optical and process proximity correction algorithms for integrated circuit manufacturing*. Citeseer, 1998.
42. **Cobb, N. B.** *Experimental results on optical proximity correction with variable-threshold resist model*. 1997.



43. **Mutsuهارu, Y.** *Comparison of Lithographic Performance between MoSi Binary mask and MoSi Attenuated PSM.*, Yokohama-Japan : SPIE, 2009, Vol. 7379. 0277-786X.
44. **Levenson, M. D.** *Improving resolution in lithography with phase shifting mask.* IEEE, 1982, Vol. 29.
45. **Eom, T-S.** *Comparative Study of Binary Intensity Mask and Attenuated PSM mask using hyper NA immersion lithography for sub 45nm Era.* SPIE, 2008, Vol. 6924.
46. **Lin, B. J.** *The attenuated Phase-shifting mask.* 1, Solid state technology, 1992, Vol. 35.
47. **Galand, G.** *Thèse: Génération automatique de motifs pour les masques à décalage de phase alternés.* Grenoble : Université de Joseph Fourier, 1999.
48. **Toh, K.** *Chromeless phase shifted mask: a new approach to phase shifting masks.* SPIE, 1990, Vol. 1496.
49. **Toru, K.** *Evaluation of quartz dry etching profile for the PSM lithography performance.* Yokohama-Japan : SPIE, 2005, Vol. 5853. 0277-786X.
50. **Iwai, H.** *Future nanoelectronic device technologies -high-k, nanowire, and alternative channel-. p1,* Tokyo : IWJT, 2008.
51. **Lin, B. J.** *Optical lithography-present and future challenges.* 2006.
52. **Voisin, P.** *Thèse: Lithographie de nouvelle génération par nanoimpression.* Grenoble : Université de Joseph Fourier, 2007.
53. **Brewer, G. R.** *Electron beam technology in microelectronic fabrication .* New york : Academic press, 1980.
54. **Chou, S. Y.** *Sub 10nm imprint lithography and application.* 2897-2904, J. Vac. Sci. Technol, 1997, Vol. B, 15(6).
55. **Bjorkholm, J.E.** *EUV lithography-the successor to optical lithography?* Santa-Clara. California, 2008.
56. **Hand, A.** [http://www.edn.com/article/509434-EUV\\_lithography\\_cannot\\_come\\_soon\\_enough.php](http://www.edn.com/article/509434-EUV_lithography_cannot_come_soon_enough.php). *Electronics Design News.* [En ligne] 22 Juin 2010.
57. <http://www.physorg.com/news80410095.html>. *Physorg.* [En ligne] 18 Octobre 2006.
58. **Manakli, S.** *Thèse: Amélioration de la profondeur de champ de la lithographie CMOS sub 0,1µm par des méthodes de double exposition.* Grenoble : Institut National Polytechnique de Grenoble, 2003.
59. **LaPedus, M.** <http://www.eetimes.com/electronics-news/4210901/EUV-tool-costs-hit--120-million->. *eetime news and analysis.* [En ligne] 19 Novembre 2010.
60. **Maenhoudt, M.** *Double patterning scheme for sub-0.25 k1 single damascene structures.* 1508-1518, SPIE, 2005, Vol. 5754.

61. **Maenhoudt, M.** *Alternative process schemes for double patterning that eliminate the intermidate etch step.* 6924-24, SPIE, 2008, Vol. 6924.
62. **Wakamatsu, G.** *Double patterning process with freezing technique.* 7273-10, SPIE, 2009, Vol. 7273.
63. **Nakamura, T.** *Development of freezing free LLE process.* 6th International Symposium on immersion lithography extensions, 2009.
64. **Wong, P.** *Litho-Process-Litho for 2D 32nm hp logic and DRAM double patterning.* SPIE, 2010, Vol. 7640.
65. **Finders, J.** *Solutions for 22nm node patterning using ArFi Technology.* SPIE, 2011, Vol. 7973.
66. **Dusa, M.** *Pitch doubling through dual-patterning lithography challenges in integration and litho budgets.* SPIE, 2007, Vol. 6520.
67. **Villaret, A.** *Thèse: Nouvelles architectures de mémoires embarquées compatibles CMOS.* Grenoble : Institut National Polytechnique, 2004.
68. **Babaud, L.** *Thèse: Développement et optimisation d'un procédé de gravure de grille polysilicium pour les noeuds technologiques 45nm et 32nm.* Grenoble : Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
69. **Shiu, W.** *Spacer double patterning technique for sub-40nm DRAM manufacturing process development.* 71403Y, SPIE, 2008, Vol. 7140.
70. **Chang, Y-S.** *Full area pattern decomposition of selph alignes double patterning for 30nm node NAND FLASH process.* SPIE, 2010, Vol. 7637.
71. **Jung, W.Y.** *Patterning with spacer for expanding the resolution limit of current lithography tool.* 6156-1J, SPIE, 2006, Vol. 6156.
72. **Finders, J.** *Litho and patterning challenges for memory and logic applications at the 22nm node.* SPIE, 2010, Vol. 7640.
73. **Finders, J.** *Dense lines created by spacer DPT scheme: process control by local dose ajustment using advanced scanner control.* SPIE, 2009, Vol. 7274.
74. **Owa, S.** *Immersion lithography extension down to 10nm half pitch .* SPIE, Litho Vision , 2010.
75. **Arnold, W. H.** *Towards 3nm overlay and critical dimension uniformity: an integrated error budget for double patterning lithography.* 692404-6, SPIE, Vol. 6924 .
76. **Farys, V.** *Enabling 22nm logic node with advanced RET solutions.* 79730T, SPIE, 2011, Vol. 7973.
77. **Cho, M.** *Double Patterning Technology Friendly Detailed Routing.* 506-511, Univéristé d'Austin-Texas : IEEE, 2008.
78. **Maquin, D.** *Eléments de théorie des graphes et programmation linéaire.* Laurraine : Institut national polytechnique de Laurraine, 2003.

79. **Chiou, T-B.** *Development of Layout Split Algorithms and Printability Evaluation.* 69243M, SPIE, 2008, Vol. 6924.
80. **Drapeau, M.** *Double Patterning Design Split Implementation and Validation for the 32nm node.* SPIE, 2007, Vol. 6521.
81. **Eiselt, H. A.** *Arc routing problems: the chinese postman problem.* Operation research , 1995, Vol. 43.
82. **Gondran, M.** *Graphes et algorithmes. Chapitre 2: le problème du plus court chemin.* Paris : Eyrolles, 1979.
83. **Kwan, M.K.** *Graphic programming using odd and even points.* 273, Chinese mathematics, 1962, Vol. 1.
84. **IBM.** *Geometric autogeneration of "hard" phase-shift designs for VLSI.* 537 648 USA, 16 Juillet 1996.
85. **Gibbs, N. E.** *A cycle generation algorithm for finite undirected linear graphs.* 564-568, Journal of the association of the computing, 1969, Vol. 16.
86. **Galand, G.** *Thèse: Génération automatique de motifs pour les masques à décalage de phase alternés.* Institut national polytechnique de Grenoble, 1999.
87. **Bruinj, N. G. De.** *A colour problem for infinite graphs and a problem in the theory of relations.* Amsterdam : Mathematics, 1951, Vol. 54.
88. **Nikolsky, P.** *Topological and model based approach to native conflicts correction and pitch decomposition for double patterning.* Cambridge : IEEE, 2008, Vol. 382-386.
89. **Smith, B. W.** *Revealing the causes of across-pitch imaging differences.* SPIE, 2003, Vol. 5040, p 399-407.
90. **Wong, A. K.** *Resolution enhancement techniques in optical lithography.* 17, SPIE, 2001.
91. **Mack, C.** *Fundamental Principles Of Optical Lithography.* Wiley, 2007.
92. **Terasawa, T.** *Theoretical calculation of mask error enhancement factor for periodic pattern imaging.* 12B, Jpn, J. Appl. Phys, 2000, Vol. 39.
93. **Manakli, S.** *Thèse: Amélioration de la profondeur de champ de la lithographie CMOS sub 0,1µm par des méthodes de double exposition.* Grenoble : Institut National Polytechnique de Grenoble, 2003.
94. [http://en.wikipedia.org/wiki/Computational\\_geometry](http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_geometry). *Wikipédia*. [En ligne]
95. **Berg, M. De.** *Computational geometry: algorithms and applications.* Springer, 2008.
96. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Probl%C3%A8me\\_du\\_postier\\_chinois](http://fr.wikipedia.org/wiki/Probl%C3%A8me_du_postier_chinois). *Wikipedia*. [En ligne] 30 Mars 2011.
97. **Isoz, V.** <http://www.sciences.ch/htmlfr/geometrie/geometriegraphes01.php>. [En ligne] 22 Fevrier 2011.
98. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Graphe\\_eul%C3%A9rien](http://fr.wikipedia.org/wiki/Graphe_eul%C3%A9rien). *Wikipédia*. [En ligne]

99. **Gondran, M.** *Graphes et algorithmes: Le problème du postier chinois non orienté*, P278-281. Paris : Eyrolles, 1979.
100. **Barahona, F.** *On some applications of the chinese postman problem*. Springer-Verlag, 1990, pages 1-15.