



**HAL**  
open science

# Etablissement de règles de dessin pour les niveaux VIA du noeud technologique 10 nm avec le procédé d'impression DSA

Loïc Schneider

► **To cite this version:**

Loïc Schneider. Etablissement de règles de dessin pour les niveaux VIA du noeud technologique 10 nm avec le procédé d'impression DSA. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Grenoble Alpes, 2018. Français. NNT : 2018GREAT006 . tel-01844319

**HAL Id: tel-01844319**

**<https://theses.hal.science/tel-01844319v1>**

Submitted on 19 Jul 2018

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

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

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

### **DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **NANO ELECTRONIQUE ET NANO TECHNOLOGIES**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

**Loïc SCHNEIDER**

Thèse encadrée par **Vincent FARYS** et **Emmanuelle SERRET**,  
Thèse dirigée par **Claire FENOUILLET-BERANGER**,

préparée au sein du **Laboratoire CEA/LETI** et de  
**STMICROELECTRONICS**  
dans l'**École Doctorale Electronique, Electrotechnique,  
Automatique, Traitement du Signal (EEATS)**

### **Etablissement de règles de dessin pour les niveaux VIA du nœud technologique 10 nm avec le procédé d'impression DSA**

### **Enablement of DSA for VIA layer for a 10 nm technology node using Design Rules**

Thèse soutenue publiquement le **5 février 2018**,  
devant le jury composé de :

**Madame Claire FENOUILLET-BERANGER**

IGR, CEA LETI, Directeur de thèse

**Monsieur Regis OROBTCHOUK**

Maître de Conférences, INSA-Lyon, Rapporteur

**Monsieur Gerard GRANET**

Professeur, Institut Blaise Pascal à Clermont Ferrand, Rapporteur

**Monsieur Olivier PARRIAUX**

Professeur Emérite, Université Jean Monnet, Examineur

**Madame Isabelle Schanen**

Professeur des Universités, Grenoble INP, Président



*"Nobody know what happened next"*

# *Remerciements*

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidés pendant l'élaboration de ma thèse et notamment ma directrice Claire Fenouillet-Beranger, pour son intérêt et son soutien, sa grande disponibilité et ses nombreux conseils durant la rédaction de ma thèse.

Je tiens aussi à remercier Vincent Farys et Emmanuelle Serret qui m'ont beaucoup appris tout au long de cette thèse. Leurs très nombreux conseils et leur aide m'ont été très précieux. Je tiens à les remercier aussi pour leurs nombreuses relectures du manuscrit.

Je tiens à remercier toute l'équipe RET qui m'a accueillie et avec laquelle j'ai passé de très bons moments, Emek, Nacer, Pierre, Elodie, Estelle, Christian, Charlotte, Jean-Gabriel, Catherine, Jean-Noël, Bastien, Sylvain, Guillaume, Jean-Luc, Amine et enfin un remerciement spécial à Stuart pour avoir passé 3 ans juste à côté de moi sans s'être agacé par mes gesticulations !

Je tiens à remercier les "fournisseurs" très sympatiques, Frédéric, Jorges, Michael, Alexandre, Pascal, Anna et Nassima de l'équipe Mentor ainsi que Laurent, Raphael, Nicolas et Chris de l'équipe Brion.

Je tiens à remercier les personnes du LETI avec lesquelles j'ai eu l'occasion de travailler, Sébastien et Jérôme.

Je tiens à remercier ma famille, mon papa, ma maman et ma soeur qui m'ont très bien supporté durant ces travaux.

Je tiens enfin à remercier mon boubou d'amour avec qui j'ai eu l'occasion de vivre non pas une thèse mais deux !

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>ii</b>
<b>Table des matières</b>	<b>iii</b>
<b>Tables des Figures</b>	<b>v</b>
<b>Listes des Tables</b>	<b>viii</b>
<b>Abréviations</b>	<b>ix</b>
<b>1 Preamble, la genèse de la microélectronique</b>	<b>1</b>
1.1 Les calculatrices mécaniques . . . . .	2
1.2 L'utilisation de l'électricité . . . . .	4
1.3 La naissance d'une nouvelle architecture . . . . .	5
1.4 L'architecture Von Neumann . . . . .	6
1.5 Conclusion . . . . .	6
<b>2 Introduction</b>	<b>8</b>
2.1 L'ère de la microélectronique . . . . .	8
2.1.1 L'introduction du transistor . . . . .	8
2.1.2 L'impression des circuits intégrés . . . . .	9
2.2 Industrie de la microélectronique . . . . .	10
2.2.1 La micro-lithographie optique . . . . .	11
2.2.2 Procédés lithographiques avancés . . . . .	15
2.2.3 La variabilité . . . . .	21
2.2.4 Les règles de dessin . . . . .	22
2.3 Niveau d'interconnexion 10 nm . . . . .	25
2.4 Objectifs de la thèse . . . . .	26
<b>3 Critère de fiabilité</b>	<b>29</b>
3.1 Règle de dessins . . . . .	29
3.2 Fiabilité des interconnexions . . . . .	30
3.3 Critère de fiabilité : recouvrement entre lignes et VIA . . . . .	32
3.3.1 Calcul analytique : cas idéal d'un VIA rond . . . . .	32

3.3.2	Impact des variabilités . . . . .	33
3.4	Traduction du critère statistique . . . . .	35
3.4.1	Méthode Monte-Carlo pour la prise en compte des variabilités . . . . .	36
3.4.2	Etablissement d'un critère de déplacement systématique . . . . .	40
3.4.3	Définition des règles de dessin . . . . .	41
3.5	Conclusion . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Analyse expérimentale de la variabilité</b>	<b>45</b>
4.1	Extraction des contours . . . . .	49
4.1.1	Réduction du bruit de l'image . . . . .	49
4.1.2	Applanissement de l'image . . . . .	54
4.1.3	Techniques d'extraction des contours . . . . .	56
4.2	Détection de la topographie . . . . .	57
4.2.1	Définition et détection des primitives . . . . .	58
4.2.2	Identification de la topographie. . . . .	59
4.3	Mise en place de la métrologie . . . . .	62
4.3.1	Régression d'ellipses . . . . .	62
4.3.2	Squelette topologique, un puissant outil de mesure . . . . .	63
4.4	Applications . . . . .	69
4.4.1	Mesures pour le DSA . . . . .	69
4.4.2	Exemple d'analyse pour niveau métallique 28 nm . . . . .	71
4.4.3	Traitement de masse . . . . .	73
4.5	Conclusion . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Application à un niveau d'interconnexion 10 nm</b>	<b>78</b>
5.1	Variabilités associées aux techniques utilisées . . . . .	78
5.1.1	Procédé SIT . . . . .	78
5.1.2	Procédé DSA . . . . .	79
5.1.3	Traduction du critère statistique . . . . .	79
5.2	Création des structures de tests . . . . .	80
5.2.1	Librairies de guides . . . . .	81
5.2.2	Les structures de tests . . . . .	82
5.3	Le squelette comme outil de prédiction . . . . .	84
5.3.1	Comparaison avec le modèle Ohta-Kawasaki . . . . .	85
5.3.2	Plage de validité du squelette . . . . .	86
5.4	Génération des règles de dessin . . . . .	89
5.4.1	Résultats . . . . .	89
5.4.2	La percolation comme moyen de vérification du set de règles . . . . .	91
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>95</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>99</b>

# Table des figures

2.1	Masque de Rubylith . . . . .	9
2.2	Etapes du procédé lithographique. (a) Etalement de la résine sur le substrat. (b) Exposition de la résine. (c) Profil de la résine après développement. . . . .	12
2.3	(a) Illustration d'un design avec plusieurs niveaux. (b) Ensemble de masques pour l'impression des niveaux. . . . .	12
2.4	Evolution de la lithographie. . . . .	13
2.5	Influence de l'OPC sur la production des motifs. . . . .	14
2.6	Etapes du procédé LELE. (a) Première lithographie. (b) Gravure. (c) Deuxième lithographie. (d) Gravure. . . . .	16
2.7	Décomposition d'un design en 2 masques pour la double exposition. . . . .	17
2.8	Etapes du procédé SIT. (a) Création du mandrin et dépôt de l'espaceur représenté en gris. (b) Gravure. (c) Retrait du mandrin. (d) Dépôt du masquage. (e) Gravure. (f) Retrait du masquage ainsi que de l'espaceur. . . . .	17
2.9	Vue de dessus des étapes du procédés SIT. (a) Dépôt du mandrin et de l'espaceur. (b) Gravure du mandrin. (c) Dépôt du masquage. (d) Motifs finaux. . . . .	18
2.10	Exemple de design impossible à imprimer avec le SIT. . . . .	19
2.11	Etapes du procédé Directed Self-Assembly (DSA). . . . .	20
2.12	Images SEM prises après gravure du PMMA. (a) Cas $f=0.5$ et (b) cas $f = 0.3$ . . . . .	20
2.13	Répartition de la tension de seuil $V_t$ en fonction du CD poly. . . . .	22
2.14	Définition d'une règle pour le recouvrement entre contact et ligne de metal. . . . .	23
2.15	Illustration d'un design régulier. . . . .	25
2.16	Illustration de l'impression de contacts à l'aide du procédé DSA. Le design à imprimer est illustré en bleu. En vert est illustré le guide idéal qui va produire des contacts correctement positionné par rapport au design. En rouge est illustré un guide déformé qui va produire des contacts qui ne sont pas correctement placés. . . . .	27
3.1	Motifs imprimés à différentes conditions procédés. . . . .	30
3.2	Description d'une jonction et variabilités associés . . . . .	33
3.3	Aire de recouvrement normalisé et critère de fiaibilité. . . . .	34

3.4	Evolution du déplacement maximal admissible en fonction de la variabilité . . . . .	35
3.5	Exemple de jonctions à condition nominale. L'aire de recouvrement entre la ligne et le contact est illustrée en jaune. . . . .	38
3.6	Evolution du pourcentage de connexions ayant une aire inférieure au critère de recouvrement en fonction du déplacement moyen $m_d$ pour des valeurs de variabilité $\sigma_W = 1.2$ nm, $\sigma_R = 0.75$ nm et $\sigma_d = 2.8$ nm . . . . .	41
3.7	Etablissement des règles de dessins. . . . .	42
4.1	(a) Image SEM. L'intensité représente la réponse électronique de l'échantillon illuminé. Plus l'intensité est importante et plus le capteur a reçu d'électrons. (b) Variation de l'intensité de l'image le long de la droite verte illustrée sur l'image (a). . . . .	47
4.2	Exemples de voisinages pour le filtre de Nagao. . . . .	50
4.3	Atténuation du bruit et meilleures extractions de contours possible obtenues. (a) Linéaire. (b) Médian. (c) Nagao. (d) NL-means. (e) Nagao pondéré. . . . .	52
4.4	Image avec un agrandissement en haut et en bas la transformée de Fourier associée. (a) Image originale. (b) Image filtrée avec le filtre de Nagao. (c) Image filtrée avec le filtre de Nagao pondérée. . . . .	53
4.5	Applanissement d'image SEM à l'aide d'une régression polynomiale. . . . .	55
4.6	Exemple de détection de contours en utilisant la technique à seuil simple. (a) Image originale. (b) Image originale et contours détectés représentés en ligne blanche. . . . .	57
4.7	Identification des primitives d'une image SEM. . . . .	58
4.8	Représentation en graphe d'une image SEM. . . . .	61
4.9	Amincissement successif de l'objet pour l'obtention du squelette représenté en orange. . . . .	65
4.10	Identification des primitives d'une image SEM. . . . .	66
4.11	Identification des primitives d'une image SEM. . . . .	66
4.12	Evolution des propriétés du squelette en fonction du seuil. . . . .	68
4.13	Résultats des régressions d'ellipse sur les motifs extraits . . . . .	70
4.14	Utilisation du squelette topologique comme outil de prédiction du placement des centres de domaines de PMMA. . . . .	71
4.15	Exemple de squelettes extrait sur une image. . . . .	72
4.16	Moyenne et écart type du rayon du squelette des primitives présentent sur la figure 4.7a. . . . .	73
4.17	Regroupement hiérarchique des images en se basant sur la matrice des distances. (a) Représentation à l'aide d'un arbre phylogénétique. (b) Exemple d'images utilisées dans (a). (c) Positions des images sur plaquettes. . . . .	76



5.1	Utilisation du procédé DSA pour l'impression des contacts. (a) Type de guide employé en fonction de la distance entre les contacts. Les images SEM ont été prises après gravure du PMMA (étape 5 représentée sur la figure 2.11e). (b) Exemple des guides à imprimer pour l'obtention des contacts. En jaune sont représentés les cas de multiplications de contacts et en rouge les cas de shrink de contact.	80
5.2	Répartition des types de guides d'un niveau VIA 10 nm de 40000 $\mu\text{m}^2$ . A droite sont illustrés les motifs les plus représentatifs. Le guide imprimé par l'étape lithographique est illustré en rouge.	81
5.3	Illustration de l'effet de proximité. En bleu sont illustrés les VIA, en rose les guides tels qu'ils sont sur masques et enfin les contours rouges représentent les guides sur silicium.	82
5.4	Structure de tests.	83
5.5	Images SEM de guide dont la partie PMMA a été gravé. Le contour du guide est illustré en bleu et le squelette du guide est illustré en trait blanc. Les cercles blancs illustrent les frontières des boules maximales.	84
5.6	(a) Représentation d'une chaîne de PMMA (b) ainsi que d'une chaîne de PS. (c) Représentation simplifiée d'un copolymère à bloc.	85
5.7	Comparaison entre le placement des domaines de PMMA simulés à l'aide du modèle Ohta-Kawasaki, représenté en rouge et en vert foncé pour les centres, et le squelette du guide représenté en vert.	87
5.8	Répartition des distances entre les centres des domaines de PMMA et des squelettes.	87
5.9	Positionnement des chaînes de polymères au sein d'un guide. Le domaine de PMMA est centré par rapport au guide. (a) Cas confiné. (b) Cas non confiné.	88
5.10	(a) Erreur de placement entre le squelette et les domaines de PMMA et distance maximale entre le guide et le squelette. (b) Pour chaque guide, l'erreur de placement maximale est représentée en fonction de la distance maximale entre le guide et le squelette.	89
5.11	Evolution du nombre de règles de dessins pour chacun des groupes d'interactions en fonction de l'erreur systématique tolérée.	90
5.12	Exemple de définition de groupes.	90
5.13	Exemple d'une règle de dessin.	91
5.14	Grilles de contraintes.	92

# Liste des tableaux

4.1	Temps de calcul pour un ensemble de 100 images de taille 512 x 512 pixels. . . . .	53
4.2	Indicateurs du type de topographie. . . . .	60
4.3	Avantages et inconvénients des méthodes de squelettisation. . . . .	69

# Abréviations

<b>AOI</b>	Area Of Interest
<b>ArF</b>	Argon Fluoride
<b>BCP</b>	Block-CoPolymer
<b>CD</b>	Critical Dimension
<b>DSA</b>	Directed Self-Assembly
<b>EUV</b>	Extreme Ultraviolet
<b>KrF</b>	Krypton Fluoride
<b>LELE</b>	Litho-Etch Litho-Etch
<b>OPC</b>	Optical Proximity Correction
<b>PA</b>	Process Assumption
<b>PMMA</b>	Polyméthacrylate de méthyle
<b>PS</b>	Polystyrène
<b>RET</b>	Resolution Enhancement Techniques
<b>SEM</b>	Scanning Electron Microscope
<b>SIT</b>	Sidewall Image Transfer
<b>SADP</b>	Self Aligned Double Patterning
<b>SMO</b>	Source Mask Optimization
<b>VIA</b>	Vertical Interlayer Access

*A tous les dyslexiques oubliés. . .*

# Chapitre 1

## Préambule, la genèse de la microélectronique

On présente souvent, à tort, l'invention du transistor comme étant le début de la microélectronique [1]. C'est oublier les avancées qui ont été faites à la fois sur un plan théorique, en particulier sur la compréhension des machines à calculer, puis des ordinateurs et sur le plan des aspects technologiques associés : passage d'une conception mécanique avec des engrenages à une conception de plus en plus basée sur des composants électriques (relais électromécaniques, tubes à vide, transistors).

Pour faciliter les calculs, les hommes ont depuis longtemps recours à des techniques permettant de simplifier, et/ou d'accélérer les calculs. La plus vieille trace d'outils mathématiques remonte à environ 35000 ans avant JC : il s'agit d'un outil appelé *os de Lebombo*, ressemblant étrangement à des bâtons de comptage. C'est un os de babouin comportant 29 encoches et qui aurait servi à compter les cycles lunaires [2]. Il s'agit donc du premier, ou en tout cas du plus ancien système mnémotechnique connu permettant d'enregistrer un nombre. Néanmoins, son utilisation est encore en cours de débat [3].

Plus tard, les bouliers ont fait leur apparition et ont considérablement simplifié le calcul des opérations arithmétiques. Leur origine n'est pas connue avec précision. Ils semblent être apparus de manière indépendante dans plusieurs régions du monde. Par exemple, la première trace de documentation d'un abaque en Chine est datée de 2 siècles avant JC [4]. Le boulier est le premier instrument de calcul portable qui permet de faire des opérations arithmétiques en un temps record.

Ce dispositif est encore couramment utilisé dans les pays d'Asie en raison de sa facilité d'utilisation ainsi que de son faible coût de fabrication et de sa fiabilité.

## 1.1 Les calculatrices mécaniques

**La Pascaline.** Les premiers mécanismes permettant d'effectuer des calculs furent les abaques, mais ceux-ci ne peuvent pas être considérés comme des calculatrices mécaniques. Il faut attendre 1642 et Blaise Pascal pour voir l'apparition d'une première machine à calculer. Pour aider son père dans son travail de receveur des impôts, il eut l'idée de construire une machine permettant de faciliter les calculs arithmétiques [5]. Son objectif était de mettre au point une machine robuste permettant d'effectuer des additions ainsi que des soustractions. C'est ainsi, après avoir créé de nombreux prototypes, que Pascal en 1645 fournit au chancelier Pierre Séguier un exemplaire fonctionnel de sa machine.

Lors de la mise au point de sa machine, Pascal s'est confronté à des problèmes conceptuels et techniques. Sur le plan technique, il a dû créer tout un système à base d'engrenages prenant en compte toutes les implications de l'addition, y compris le difficile problème du report des retenues : il met en place un système de sautoir permettant d'ajouter la retenue à l'unité suivante. De plus, pour permettre la soustraction avec sa machine, il a mis au point la méthode du complément qui permet d'effectuer une soustraction en utilisant seulement des additions.

Les principaux inconvénients de la machine de Pascal sont l'impossibilité d'effectuer des multiplications ainsi que des divisions et aussi la précision nécessaire pour construire les pièces constituant la machine : des imposteurs essayant de copier la machine ne parviennent pas à en créer une fonctionnelle, les pièces requérant une précision suffisante [6].

Parmi les autres problématiques rencontrées, l'opérateur doit choisir au préalable l'opération à effectuer et ne peut encore moins effectuer des boucles pour répéter une opération. Néanmoins, les travaux de Pascal ont lancé un mouvement nouveau qui permettra l'avènement de la microélectronique.

Malgré l'obtention d'un privilège royal en 1649 (l'équivalent aujourd'hui d'un brevet), la commercialisation de la Pascaline fut un échec, essentiellement en raison de son prix élevé. Pascal tenta de développer une machine plus simple afin de la rendre accessible au grand public mais il échoua.

On voit se dessiner un schéma récurrent dans l'histoire de l'ordinateur : des avancées théoriques permettant de simplifier ou de mieux découper un problème et leur mise en application en utilisant les briques technologiques existantes. On voit également apparaître ici, la notion de marché. En effet, malgré les progrès notables de la Pascaline, celle-ci arrive trop tôt par rapport aux besoins du marché.

**Amélioration de la pascaline.** De nombreuses améliorations et modifications ont été apportées à la Pascaline. On peut noter par exemple une tentative ratée de Leibniz d'implémenter la multiplication et la division à la machine. Il introduisit pour cela deux nouveaux concepts qui ont été largement utilisés par la suite, à savoir la roue à nombre variable de dents et le cylindre cannelé qui jouait le rôle de mémoire [4].

Au début du XVIIIème siècle, les principes et la conception de ces machines à calculer étaient bien compris, ce qui explique le succès commercial de certains modèles comme l'Arithmomètre d'Odhner [7].

Néanmoins, avec ces évolutions, on ne peut effectuer que des calculs simples : il est impossible d'enchaîner les calculs. C'est en 1812 que les premières bases d'une architecture moderne de l'ordinateur sont dessinées. Charles Babbage, un mathématicien anglais, se pencha sur la question de l'automatisation des calculs de tables nautiques, astronomiques et mathématiques après avoir observé que celles-ci comportaient de nombreuses erreurs pouvant aboutir à des calculs de trajectoire erronés [8, 9].

Afin de fiabiliser les tables de calcul il eut l'idée d'une machine permettant d'automatiser leurs calculs. Après 20 ans d'efforts, il ne parvint pas à en finir la conception. Néanmoins, durant cette période, il prend connaissance du métier à tisser de Jacquard qui fut inventé par Joseph Marie Jacquard en 1804 [10]. Celui-ci utilise une série de cartes perforées permettant ainsi la programmation du métier à tisser. Babbage abandonna la construction de sa "machine à différence" et en commença une nouvelle, plus générale, qui devait être une machine à calculer programmable [11].

On y retrouve des éléments qui, bien que nommés différemment, existent toujours dans les architectures modernes d'ordinateur, à savoir :

- Un lecteur permettant de lire les instructions et les données du programme qui sont écrites sur des cartes perforées.
- Un moulin qui exécute les opérations sur les nombres.

- Un magasin qui fait office de mémoire pour stocker les résultats.
- Et enfin une unité de commande qui coordonne les opérations entre le moulin et le magasin. Une version moderne de cette unité s'appellerait un microprocesseur.

Babbage ne parvint pas à finaliser sa machine mais laissa derrière lui les prémices d'une science nouvelle, celle de la programmation et de l'informatique ! Il faut savoir que l'utilisation des cartes perforées a perduré jusqu'au XXI<sup>ème</sup> siècle puisqu'en 2000, lors de l'élection présidentielle américaine, des machines à voter fonctionnaient toujours grâce à elles.

Il est à noter que Babbage fut le premier à mettre au point une méthode pour casser le chiffrement Vigenère ce qui permit vraisemblablement aux Anglais d'espionner leurs voisins en utilisant cette méthode de chiffrement réputée à l'époque incassable [12].

Un autre détail historique amusant est la création par Herman Hollerith en 1896 de la Tabulating Machine Company qui était spécialisée dans les machines processant les cartes perforées. Le détail important est que cette société changea son nom en International Business Machines Corporation alias IBM.

## 1.2 L'utilisation de l'électricité

Une avancée majeure fut le remplacement des fonctions mécaniques de la machine analytique de Charles Babbage par des fonctions électromécaniques. Ce travail fut entrepris par Leonardo Torres Quevedo qui peut être décrit comme un inventeur prolifique étant donné son grand nombre de contributions scientifiques. Il montra que l'on pouvait utiliser des relais électromécaniques pour composer toutes les fonctions de la machine de Babbage. C'est le passage d'un système tout mécanique à un système électrique, simplifiant ainsi considérablement la réalisation des machines. Il en construisit deux modèles, l'un en 1914 et l'autre en 1920 [13].

Bien qu'utilisant maintenant des relais électromécaniques les principes mis en jeu étaient les mêmes qu'à l'époque de Babbage. La machine était construite pour faire des opérations arithmétiques et une personne devait arranger les opérations pour faire fonctionner le système. Pour cette raison on ne peut pas parler encore d'ordinateur. Aujourd'hui, lorsque l'on utilise un ordinateur, il n'y a plus à connaître l'architecture interne de la machine. Quel que soit le type d'instructions données à l'ordinateur, un clic, un code, il ne s'agit plus que d'une succession de séquences



binaires qui peuvent être prises en charge par les différents modules comme le disque-dur, le processeur, etc.

Pour parvenir à ce changement, des avancées théoriques majeures ont été faites par Alan Turing puis par John Von Neumann.

### 1.3 La naissance d'une nouvelle architecture

Vers les années 1945 et de manière indépendante, ces deux grands mathématiciens comprirent que les instructions, c'est à dire les programmes, pouvaient être stockés de la même manière que les variables. Cette idée bouleversa l'architecture des machines - ordinateur puisqu'à l'heure actuelle nous utilisons encore (avec quelques améliorations et modifications) leur conception.

En 1937, Alan Turing publie un article intitulé "On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem" [14] dans lequel il répond à une question posée en 1928 par David Hilbert, un autre brillant mathématicien [15]. Il s'agit de savoir si un algorithme peut décider si une déclaration donnée est prouvable à partir d'axiomes en utilisant les règles de la logique. Turing, dans son article, y répond de manière négative. Il démontre, à l'aide d'une machine abstraite qui est aujourd'hui appelé machine de Turing, que ce résultat est faux. En particulier, il démontre que l'énoncé de Hilbert est équivalent à ce que la machine abstraite qu'il a défini s'arrête en temps fini et qu'il existe de plus des énoncés non décidables en temps fini.

En décrivant une machine traitant de manière identique les données numériques et les instructions (les programmes), cet article eut une influence considérable car il proposait un cadre théorique, abstrait au nouveau domaine qui était en train de se créer, l'informatique.

Tout comme Babbage, on remarque le lien étroit qu'entretient Turing avec la mathématique, la cryptographie et "l'informatique", celui-ci ayant apporté une contribution majeure dans le déchiffrement du code ENIGMA utilisé durant la seconde guerre mondiale par les nazis. Sans les informations obtenues et en particulier sur le système défensif allemand, le débarquement du 6 juin 1944 aurait été impossible [16].

A cette époque, le développement de ce qui deviendra l'informatique est permis par les besoins de la guerre : la technologie est encore trop précoce pour qu'il y ait un marché associé.

## 1.4 L'architecture Von Neumann

En 1944 commence la construction du Electronic Numerical Integrator And Computer, plus connu sous le nom d'ENIAC, dont la construction prit fin en 1946. Cet ordinateur dont le fonctionnement était purement électrique permettait l'exécution de programmes pour le calcul de tables balistiques [17] et a été utilisé pour écartier l'un des schémas de conception pour la bombe à hydrogène [18]. Ces caractéristiques physiques sont impressionnantes puisque son poids est de 27 tonnes et sa surface au sol proche de 170 mètres carrés [19]. Il est capable de multiplier deux nombres en 3 ms et d'effectuer une division en 26 ms.

Il est souvent décrit comme la première machine de Turing, néanmoins, les programmes exécutés ne peuvent pas être stockés en mémoire, et des opérateurs (des programmeurs) doivent recâbler la machine et changer la position d'interrupteurs pour effectuer les instructions souhaités. L'architecture Von Neumann a justement été créée pour palier à ce problème : les instructions seraient lues et stockées comme des données numériques au sein de la machine, évitant ainsi de devoir modifier la machine elle-même pour exécuter des programmes différents. Cette architecture fut par la suite très largement adoptée pour la conception des ordinateurs.

Il est à noter que la paternité de cette architecture est débattue, Neumann attribuant lui-même la paternité de cette architecture à Turing [20].

## 1.5 Conclusion

Nous venons de voir dans ce chapitre que depuis plusieurs générations, les hommes essaient de simplifier les opérations mathématiques qu'ils doivent effectuer au quotidien. Jusqu'aux années 1950, les solutions existantes présentaient des caractéristiques qu'il n'était pas possible de réconcilier. Le boulier est très simple d'utilisation et portable mais il n'est pas possible de faire d'opérations complexes. Puis lorsque les premières unités de calcul firent leur apparition, telle que l'ENIAC, celles-ci ne pouvaient être utilisées par le grand public étant donnée leur taille et la maintenance nécessaire pour assurer leur fonctionnement. En revanche, leur vitesse de calcul était sans égale à cette époque.

Un nouveau composant, le transistor fit bientôt son apparition et engendra des changements considérables dans la société. La grande force du transistor est d'avoir

permis de réconcilier la portabilité, la fiabilité et la rapidité et a permis une nouvelle révolution, qui est la révolution de la microélectronique. Néanmoins, sa fabrication requiert une bonne maîtrise des procédés.

# Chapitre 2

## Introduction

### 2.1 L'ère de la microélectronique

Après 1940, il y eut une profusion de machines qui pouvaient se prévaloir d'être des ordinateurs. Le temps avançant, les constructions se tournèrent de plus en plus vers une architecture de type Neumann.

Parallèlement, les constituants de ces machines furent modifiés, améliorés avec comme objectif principal la réduction du labeur des opérateurs. Parmi les tâches fastidieuses, il y avait la réinitialisation des tubes à vide, leur remplacement lorsque ils avaient grillé, le recâblage des machines pour les reprogrammer. Nous invitons le lecteur désireux d'en savoir plus à lire l'article [21].

#### 2.1.1 L'introduction du transistor

Parmi les solutions mises en place, l'une des plus significatives est l'utilisation du transistor qui apparut comme étant le constituant idéal pour la fabrication d'ordinateurs. En effet, celui-ci permet de créer les constituants nécessaires à la fabrication d'une architecture de Von Neumann.

A partir de ce moment tous les éléments sont en place pour voir l'explosion de l'électronique. L'architecture est bien connue, les constituants pour mettre en oeuvre les fonctionnalités nécessaires sont robustes et peuvent être miniaturisés, leur fiabilité est aussi bien meilleure et enfin le marché répondra favorablement à ce nouveau domaine. Tout les ingrédients sont là pour une nouvelle révolution !

C'est en effet en 1947 que deux chercheurs des laboratoires Bell aux Etats-Unis, John Bardeen et Walter Brattain, mirent au point le premier transistor bipolaire. Ensuite, en 1958, deux personnes vont inventer, indépendamment, le circuit intégré : Jack Kilby travaillant chez Texas Instrument et Robert Noyce de Fairchild Semiconductor. En 1968, Robert Noyce et Gordon Moore quittèrent Fairchild Semiconductor et fondèrent la société Intel.

### 2.1.2 L'impression des circuits intégrés

Afin d'imprimer les circuits intégrés, la technique prédominante, la lithographie optique, consiste à transférer un motif dans une résine photosensible. Ces motifs sont obtenus en projetant de la lumière à travers un masque opaque dont certaines zones sont ouvertes. Dans les années 60, cette technique permettait d'atteindre des résolutions de l'ordre de  $10\ \mu\text{m}$ .

Pour fabriquer ces masques, des ingénieurs dessinaient sur un substrat appelé Rubyolith qui est constitué d'un premier film en polyester transparent collé à un deuxième film rouge composé de rubis. Le film rouge est ensuite découpé sur une planche à dessin pour former les motifs à imprimer. Un exemple de masque est visible figure 2.1a et on peut voir des opérateurs couper le masque à la figure 2.1b. Le masque ainsi obtenu est ensuite copié et réduit 10 fois sur une plaque en verre qui est appelée réticule. Ce réticule est lui même réduit 10 fois pour former un masque maître. Celui-ci étant précieux, il n'est pas utilisé directement comme masque pour la photolithographie, mais des copies du maître sont utilisées à la place [22].

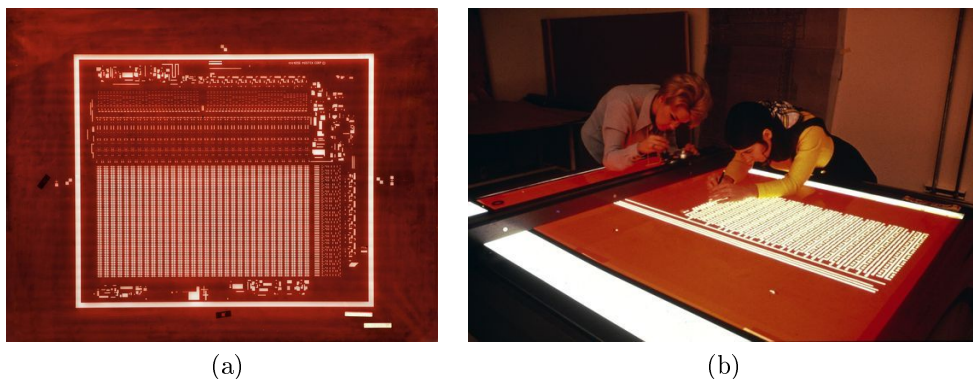


FIGURE 2.1: Rubyolith. (a) Exemple d'un masque en Rubyolith, tiré de [23]. (b) Opérateurs chargés de créer les masques, tiré de [24].

A cette époque, Intel, produisit le premier microprocesseur commercial, le 4004 composé de 2300 transistors. L'espacement minimum entre motifs était de  $10\ \mu\text{m}$ , il s'agit du premier noeud technologique. Il faut bien comprendre que l'ensemble des transistors et des connexions entre ceux-ci ont été dessinés à la main par des ingénieurs. Chaque morceau de Rubylith était vérifié à l'aide d'une loupe et éventuellement corrigé en effectuant d'autres coupes, ou en ajoutant du scotch pour supprimer des motifs [25, 26]. Les vérifications consistaient principalement à recouvrir le rubylith avec le dessin originel à la recherche de problèmes de largeur ou d'espacement. On peut dans ce contexte parler des premières vérifications de règles de dessin. Avec l'évolution des technologies, les masques furent écrits par une machine et il fut possible d'automatiser la vérification des différentes règles de dessin.

A travers les sections précédentes, nous avons pu voir l'évolution des techniques amenant petit à petit aux premiers ordinateurs ainsi que le début de la microélectronique. Durant toutes ces phases, les différents inventeurs ont du se plier aux contraintes technologiques de leur époque : mécanisme simple pour Pascal, tube à vide pour Turing. Cela a considérablement joué sur les progrès réalisés. Néanmoins, ces progrès n'auraient pu être obtenus sans une réflexion théorique pour mettre au point ces différents systèmes.

## 2.2 Industrie de la microélectronique

Depuis le Rubylith, les technologies ainsi que les techniques employées ont bien changé pour répondre aux besoins du marché. Jusqu'aux années 2010, les besoins ont entraîné la densification des circuits intégrés, c'est la fameuse loi empirique de Moore [27] : la densité de composants sur une unité de surface pour un circuit double tous les deux ans. Les principaux avantages de cette miniaturisation sont dans un premier temps une réduction des coûts de fabrication des puces et dans un second temps de meilleures performances (réduction de la tension requise pour alimenter les transistors et réduction de leur consommation électrique). A titre d'illustration, le Cray-2, un super-ordinateur conçu en 1978 est composé de 2 à 4 processeurs cadencés à 283 MHz et pese près de 2.5 tonnes [28] tandis que le dernier Iphone 7, sorti en 2017, est constitué d'un processeur composé de 4 coeurs cadencés à 2.34 GHz, le tout pesant moins de 200 g. En terme de densité, nous sommes passés d'environ  $5.10^4$  transistors/cm<sup>2</sup> à  $1.10^9$  transistors/cm<sup>2</sup>.

Ce succès est à attribuer aux innovations technologiques qui ont permis la miniaturisation des dispositifs ainsi qu'à l'élaboration de nouvelles solutions. Néanmoins le passage de l'innovation entre le monde de la recherche, avec l'apparition des premiers articles sur le sujet, à la mise en production est relativement long, de l'ordre de 10 à 15 ans [29].

Une autre alternative à la loi de Moore est le "More than Moore". Ce sont toutes les applications qui ne nécessitent pas une miniaturisation extrême mais qui en revanche font appel à différentes fonctionnalités sur un même circuit intégré. Parmi les marchés principaux, il y a l'automobile, la santé, l'énergie et la lumière et chacun de ces marchés a des besoins divers en terme de fonctionnalité : détection, communication, stockage, traitement du signal [30]. Une technologie est définie par les fonctions adressées, les matériaux utilisés, le type d'architecture ainsi que les outils utilisés.

L'un des procédés les plus critiques et qui définit les dimensions des technologies est la lithographie qui permet l'impression des motifs sur silicium. Elle a un impact considérable car elle va définir les géométries des motifs qu'il est possible d'obtenir.

### 2.2.1 La micro-lithographie optique

Le principe de la lithographie optique consiste à illuminer un masque constitué d'un matériau absorbant et de zones transparentes, les motifs du masque représentant les structures à imprimer. La lumière transmise passe ensuite à travers un système optique permettant d'obtenir un facteur de réduction de 4 et est enfin projetée sur une résine photosensible. Selon la tonalité de la résine, positive ou négative, les zones insolées ou non-insolées seront ensuite retirées à l'aide d'une solution aqueuse appelée développeur. Ces étapes sont visibles à la figure 2.2.

Sur la figure 2.3a est représenté le design possible d'un transistor avec une zone active, une grille en polycristallin (silicium), les contacts et les lignes métalliques qui permettent de connecter les transistors entre eux ainsi que de les alimenter. Ces motifs représentent des niveaux et des masques sont créés pour les imprimer. Un ensemble de masques possible est illustré figure 2.3b. Chacun de ces masques va être utilisé en lithographie pour imprimer les motifs associés qui vont ensuite être gravés et remplis ou implémentés pour constituer les composants du circuit intégré.

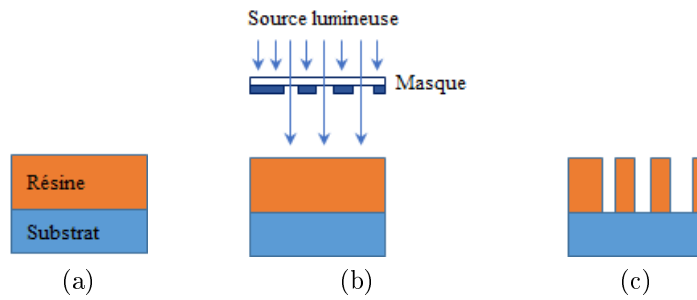


FIGURE 2.2: Etapes du procédé lithographique. (a) Etalement de la résine sur le substrat. (b) Exposition de la résine. (c) Profil de la résine après développement.

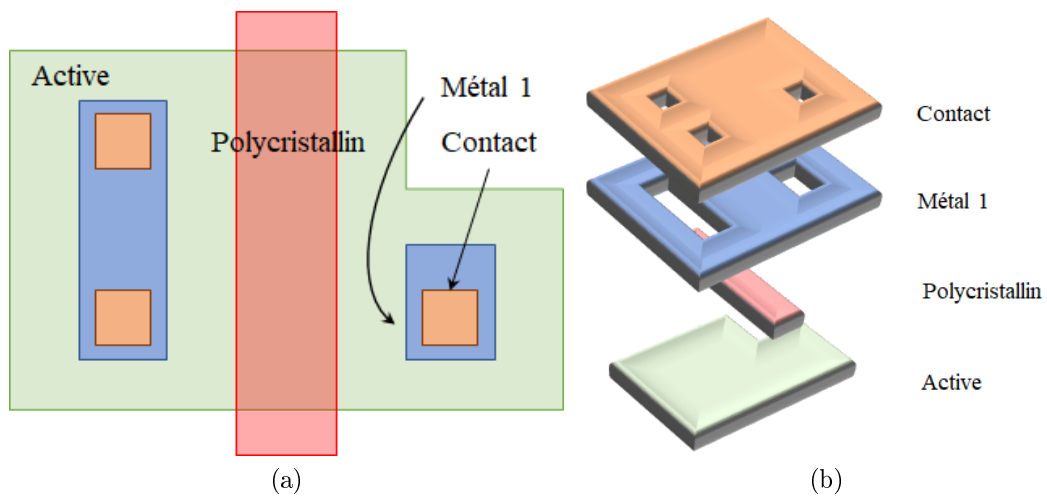


FIGURE 2.3: (a) Illustration d'un design avec plusieurs niveaux. (b) Ensemble de masques pour l'impression des niveaux.

Les motifs sur les masques étant de faible dimension par rapport à la longueur d'onde utilisée, un phénomène de diffraction va limiter la résolution atteignable par le scanner. Le critère de Rayleigh permet d'obtenir la résolution  $R$  du système optique [31] :

$$R = 0.61 \frac{\lambda}{NA} \quad (2.1)$$

avec  $\lambda$  la longueur d'onde de la source lumineuse et  $NA$  l'ouverture numérique du système optique. Cette équation représente la résolution optique d'un système optique. Dans le cas d'un scanner, on prend en compte les modifications chimiques latente de la résine en fonction de l'insolation qui vont modifier l'image optique formée sur la résine. Pour prendre en compte ces effets liés aux procédés, la résolution est remplacée par le pas  $p$  qu'il est possible d'obtenir entre motifs. Ce pas



est obtenu en modifiant le coefficient de proportionnalité 0.61 de la résolution par un facteur noté  $k_1$ . La formule devient alors :

$$p = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (2.2)$$

Le facteur  $k_1$  va englober tous les effets autres que optique. Il traduit la difficulté d'imprimer des motifs. Plus sa valeur est faible et plus il va être difficile d'obtenir les motifs désirés. Théoriquement, un  $k_1$  de 0.5 est atteignable. Avec l'équation 2.2, nous voyons que pour augmenter la densité des motifs, 3 voies sont possibles :

- Augmenter l'ouverture numérique en changeant par exemple le milieu dans lequel la projection est faite. Passer de l'air à l'eau permet de passer d'un NA de 0.95 à 1.35.
- Diminuer la longueur d'onde en changeant la source lumineuse. Par exemple, dans les années 2002, la transition d'une source Krypton Fluorid (KrF) de longueur d'onde 248 nm à une source Argon Fluoride (ArF) de longueur d'onde 193 nm a eu lieu.
- Diminution du  $k_1$  par l'amélioration des procédés.

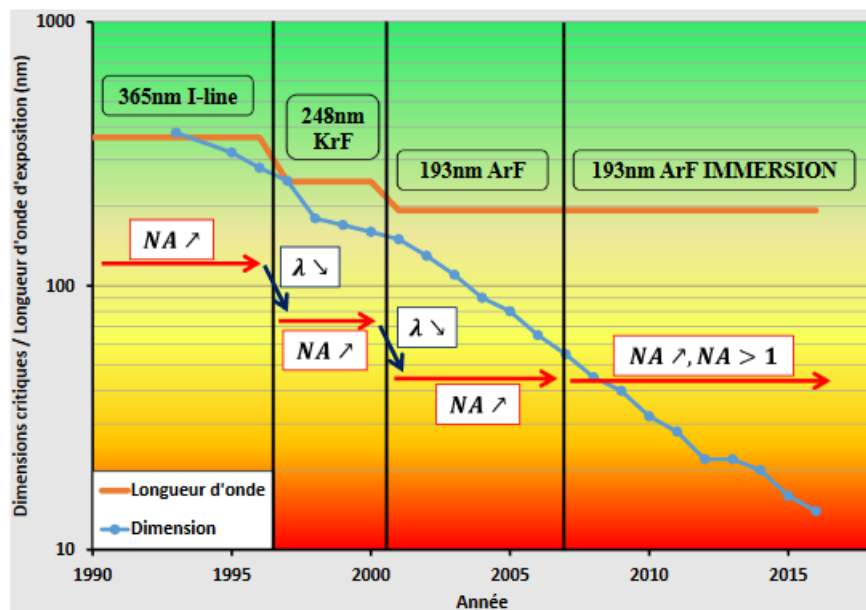


FIGURE 2.4: Evolution de la lithographie. En particulier sont montrées les changements de longueurs d'ondes et d'ouverture numérique ainsi que l'évolution du CD en bleu. Issus de [32].

Sur la figure 2.4, nous pouvons voir l'évolution du pas dans le temps. Cette évolution a été permise par l'évolution des longueurs d'ondes utilisées ainsi que de

l'ouverture numérique. Sur la figure sont visibles les transitions entre sources lumineuses et les modifications de l'ouverture numérique. L'échelle de couleur va des motifs simples à imprimer, (en vert) vers des motifs complexes à obtenir (en rouge).

Avec la réduction de la taille des motifs imprimés, l'image optique projetée sur la résine est déformée par les effets de proximité. Le système optique agit en effet comme un filtre passe bas sur les motifs imprimés sur le masque. La figure 2.5 illustre cet effet. En partant d'un design, un masque est réalisé et l'image à droite représente l'image aérienne sur le substrat. Sans correction, l'effet du filtrage est particulièrement important. Pour cette raison, des techniques sont utilisées pour assurer la fidélité entre le design et l'image obtenue sur le substrat. Ces techniques dites OPC pour Optical Proximity Correction vont chercher à optimiser la forme du masque pour compenser ces aberrations. Elles correspondent à la modification géométrique des motifs ou encore à l'ajout de motifs non-résolus. Cette correction est visible à la figure 2.5 en bas.

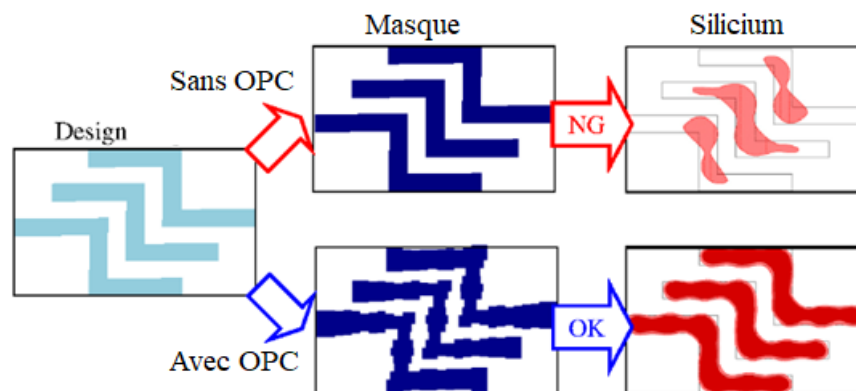


FIGURE 2.5: Influence de l'OPC sur la production des motifs. Issus de [32].

A notre disposition, le meilleur scanner disponible utilise une source ArF 193 nm à immersion, ce qui porte son ouverture numérique à 1.35, et nous pouvons disposer d'un  $k_1$  de 0.5. Le pas théorique ainsi réalisable est de 71 nm. En production, à cause des variabilités des procédés, le pas réellement atteignable est de 80 nm minimum pour des lignes et de 90 nm pour des disques. Or pour poursuivre la réduction des dimensions pour les futures noeuds technologiques, il est nécessaire de descendre au-delà de cette valeur. Pour imprimer avec un pas plus petit, des techniques alternatives doivent être envisagées.

## 2.2.2 Procédés lithographiques avancés

Il est possible de regrouper les procédés lithographiques avancés selon 2 catégories : celles qui nécessitent le développement de nouveaux équipements, et celles qui utilisent les outils déjà présents en production couplé à des techniques d'intégration de procédé qui permet d'aller au delà de la limite de résolution du scanner.

### 2.2.2.1 Nouveaux équipements

La première alternative est la diminution de la longueur d'onde. Actuellement, des développements intensifs sont en cours pour permettre l'utilisation de l'EUV (Extreme Ultraviolet) qui permet d'utiliser une longueur d'onde de 13.5 nm. Il est reporté dans [33] que l'on peut atteindre des  $k_1$  de 0.5 et un  $NA$  de 0.3 portant ainsi la périodicité à 22.5 nm. Cette technologie est en cours de mise en production.

Une autre possibilité, appelée nano-impression, consiste à façonner un moule qui va ensuite être pressé contre la résine. Cette technique permet de résoudre des motifs très fins, de l'ordre de 10 nm [34]. Néanmoins, il y a un compromis à faire entre vitesse d'impression et défektivité [35]. Typiquement, des vitesses d'impression de 0.2 cm<sup>2</sup>/s sont atteignables. En comparaison, en utilisant une lithographie ArF 193 nm, la vitesse d'impression est supérieure au cm<sup>2</sup>/s.

Enfin, la lithographie électronique (l'e-beam) est aussi une solution extrêmement intéressante puisqu'elle permet d'imprimer des motifs dont la largeur est de l'ordre de 10 nm. Il est à noter que la résolution n'est plus limitée par l'outil lui même (dont la résolution peut atteindre 0.1 nm) mais est limitée par la résine utilisée [36]. Son plus grand défaut est sa lenteur d'impression puisqu'elle est de l'ordre de 10<sup>-5</sup> cm<sup>2</sup>/s.

Les trois techniques présentées ci-dessus demandent l'installation de nouveaux équipements, au contraire des techniques qui vont être maintenant présentées.

### 2.2.2.2 Procédé double exposition, Litho-Etch-Litho-Etch

Nous commençons avec les techniques dite de double exposition (ou DP pour Double Patterning). Le principe consiste à décomposer le design d'un niveau, dont

les dimensionnels sont en dessous de la limite de résolution d'un scanner, en deux masques distincts qui vont être utilisés pour l'obtention du niveau initial [37, 38].

Une méthode particulière de double exposition est l'enchaînement lithographie-gravure-lithographie-gravure appelé LELE (pour Litho-Etch-Litho-Etch) [39, 40]. Deux couches temporaires, les masques durs, sont déposées et subissent successivement une lithographie et une gravure comme illustré figure 2.6. L'avantage majeur de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas de nouveaux équipements, ce qui est un gain considérable de temps, et d'argent. Néanmoins, elle a comme inconvénient son coût, puisqu'il est nécessaire d'avoir un masque pour chaque étape lithographique, et sa variabilité. Avant l'insolation de la résine par le scanner, il y a toujours une étape d'alignement entre le substrat et le masque pour garantir le bon placement de la couche qui va être imprimée. Or il existe toujours un différentiel de placement et lorsque deux lithographies sont réalisées successivement, les erreurs d'alignement vont s'accumuler. Il est reporté dans [41] que l'erreur de placement résultante a un écart type qui peut monter jusqu'à 4 nm pour un motif de largeur 32 nm. Par rapport à une lithographie classique, la technique LELE introduit des erreurs de placements au sein même d'un niveau en raison des 2 lithographies nécessaires, ce qui introduit une nouvelle source de variabilité.

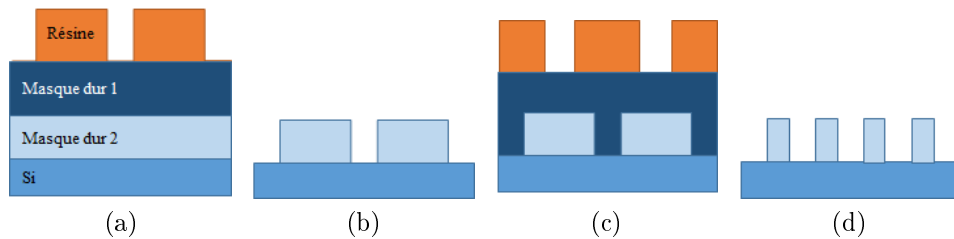


FIGURE 2.6: Etapes du procédé LELE. (a) Première lithographie. (b) Gravure. (c) Deuxième lithographie. (d) Gravure.

L'utilisation du LELE n'est possible que si le design est décomposable en 2 masques distincts. Pour s'assurer de cette décomposition, il faut imposer des règles sur les motifs qui peuvent être utilisés pour le design. A la figure 2.7 est illustrée les 2 décompositions possible d'un design en 2 masques disjoints. Cette décomposition n'est possible que si l'espacement  $e$  est supérieur à la résolution.

Des procédés innovants permettent de réduire ces problèmes de coûts et de variabilités et les deux procédés que nous allons détailler sont les suivants :

- La technique **Sidewall-Image-Transfer (SIT)**.

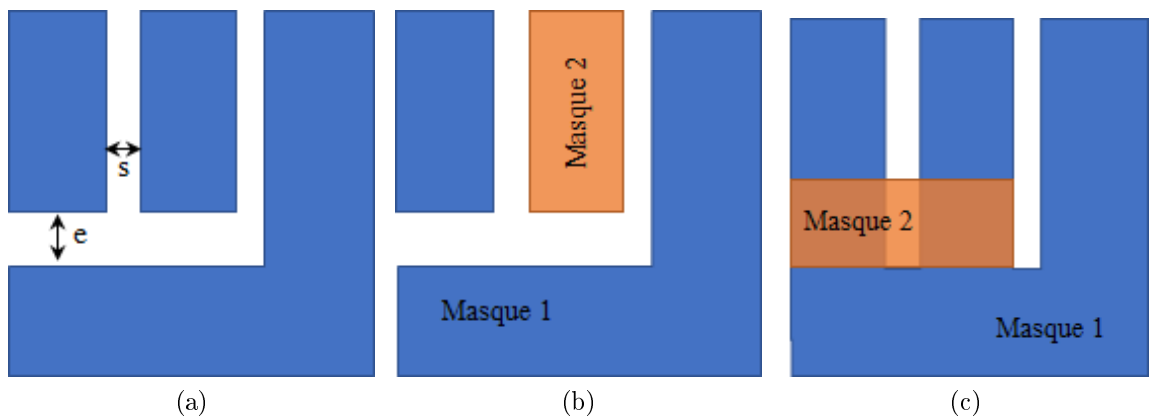


FIGURE 2.7: Décomposition d'un design en 2 masques pour la double exposition. (a) Design. (b) Décomposition dans le cas où l'espacement  $s$  est inférieur à la résolution  $R$  du scanner et où l'espacement  $e$  est supérieur à  $R$ . (c) Décomposition dans le cas où  $s$  est supérieur à  $R$  et où  $e$  est inférieur à  $R$ .

— La technique **Directed-Self-Assembly (DSA)**.

### 2.2.2.3 Procédé double exposition, Procédé SIT

La technique SIT repose sur une première lithographie pour créer le mandrin, puis sur le dépôt d'un espaceur (qui peut être un oxyde ou un nitrure visible en gris sur la figure 2.8a qui est ensuite gravé pour ne conserver que les flans de l'espaceur 2.8b et le mandrin est retiré 2.8c. Un masquage est déposé 2.8d et finalement le motif est transféré 2.8e et 2.8f.

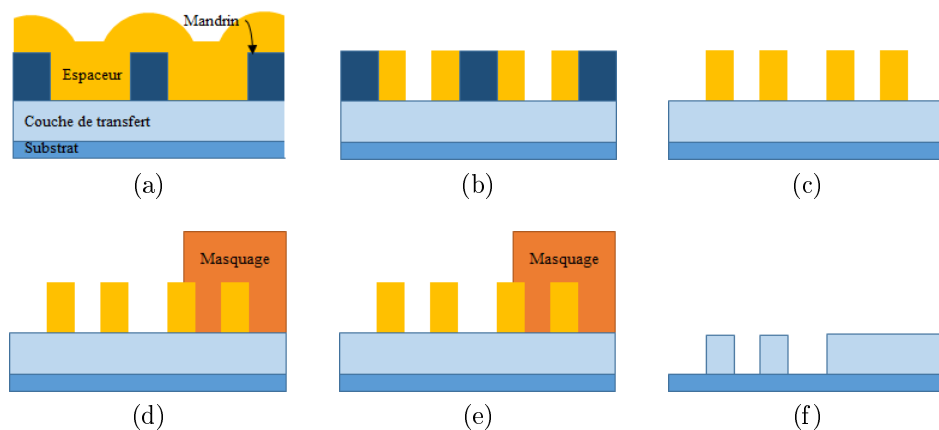


FIGURE 2.8: Etapes du procédé SIT. (a) Création du mandrin et dépôt de l'espaceur représenté en gris. (b) Gravure. (c) Retrait du mandrin. (d) Dépôt du masquage. (e) Gravure. (f) Retrait du masquage ainsi que de l'espaceur.

Ces étapes sont illustrées vu de dessus à la figure 2.9.

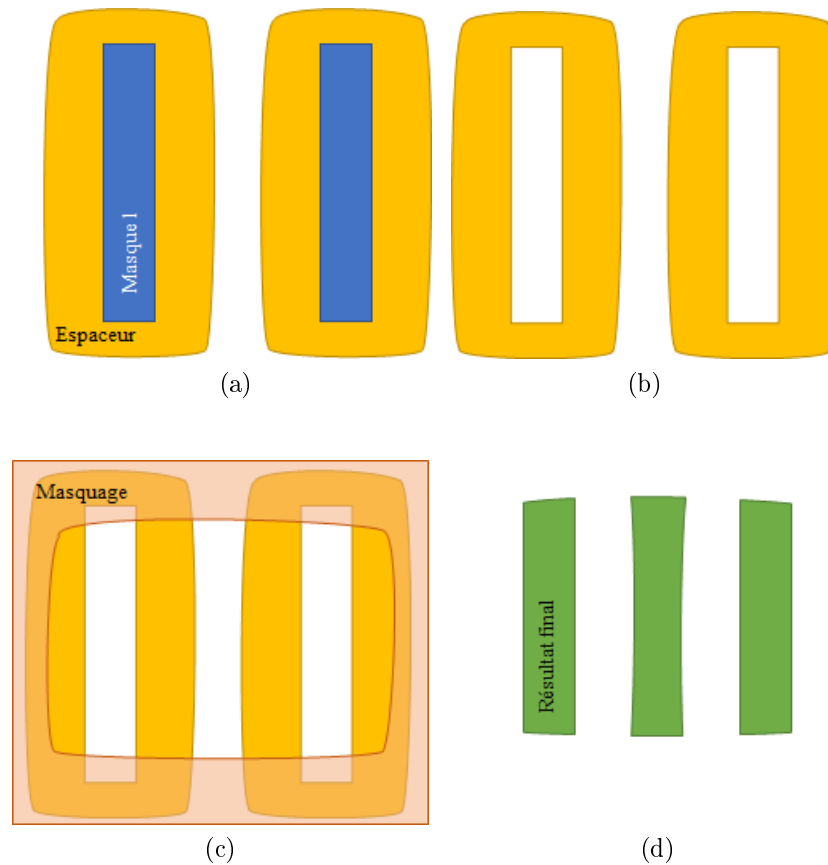


FIGURE 2.9: Vue de dessus des étapes du procédé SIT. (a) Dépôt du mandrin et de l'espaceur. (b) Gravure du mandrin. (c) Dépôt du masquage. (d) Motifs finaux.

Il est reporté que cette technique offre un meilleur contrôle de la variabilité de placement que la technique LELE qui est environ 2 fois moins élevée [41] : le mandrin définissant les lignes en 1 seul niveau de lithographie, il n'y a donc pas d'erreur de placement qui rentre en compte dans la définition de l'espacement entre motif. En revanche, cela induit sur le design des contraintes supplémentaires et il n'est pas adapté au design irrégulier car, de la même manière que pour le procédé LELE, tous les designs ne sont pas décomposables en 2 masques, mandrin et masquage. Par exemple, le design illustré à la figure 2.10a n'est pas décomposable en SIT [42] : la décomposition en 2 masques est possible mais il est très difficile de contrôler la zone où les différents espaceurs sont en contacts. En conséquence, le résultat sur silicium, visible à la figure 2.10c, n'est pas conforme au design.

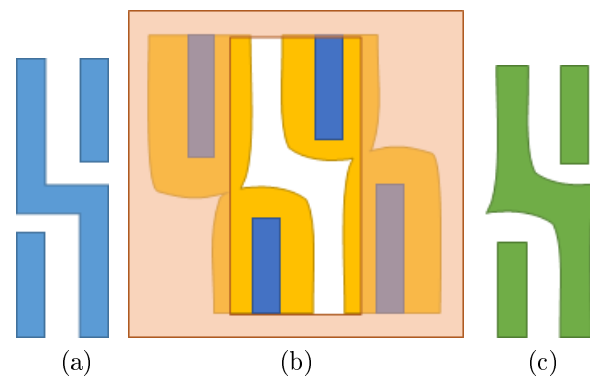


FIGURE 2.10: Exemple de design impossible à imprimer avec le SIT. (a) Design initial. (b) Le masque 1 est représenté en bleu, l'espaceur en jaune et le masque 2 de masquage est en orange transparent. (c) Résultat final.

#### 2.2.2.4 Procédé Directed Self-Assembly

La technique Directed Self-Assembly consiste à utiliser la réorganisation d'un copolymère à blocs (ou BCP pour Bloc Co-Polymer) en domaines réguliers pour l'obtention des motifs. Un copolymère à bloc est une chaîne constituée de deux polymères, dans notre cas du PS (Polystyrène) et du PMMA (Polyméthacrylate de méthyle), reliés entre eux par une liaison covalente.

Initialement, la surface est recouverte d'un mélange désordonné de PS-PMMA. Un recuit va permettre aux deux espèces PS et PMMA de s'organiser en domaines disjoints et réguliers selon une périodicité spatiale spécifique. Cette organisation peut être contrôlée de 2 façons différentes. La première méthode consiste à appliquer sur la surface et à certains endroits un traitement qui va attirer une des deux espèces. On parle alors de chemo-épitaxie. La deuxième méthode consiste à contraindre l'organisation en la forçant à avoir lieu dans un guide et il s'agit de la grapho-épitaxie. Les étapes de ce procédé sont visibles à la figure 2.11. Les deux premières étapes consistent à créer, à l'aide d'une lithographie, un guide qui va être rempli de copolymère. Ensuite un recuit va séparer les espèces et l'une des 2 espèces va être gravée. Finalement, le motif est transféré sur le substrat.

Les domaines de phases résultant de l'auto-organisation ont une taille qui est déterminée par la taille du BCP et leur forme est déterminée par la taille des polymères constituant le BCP. Si les deux polymères constituant le BCP ont la même taille, les domaines seront des lamelles (voir figure 2.12a) et si le ratio de taille entre le PMMA et le PS est de 0.3, il y aura formation de domaines circulaires (voir figure 2.12b). Avec cette technique il est possible de réduire par 3 ou 4 la

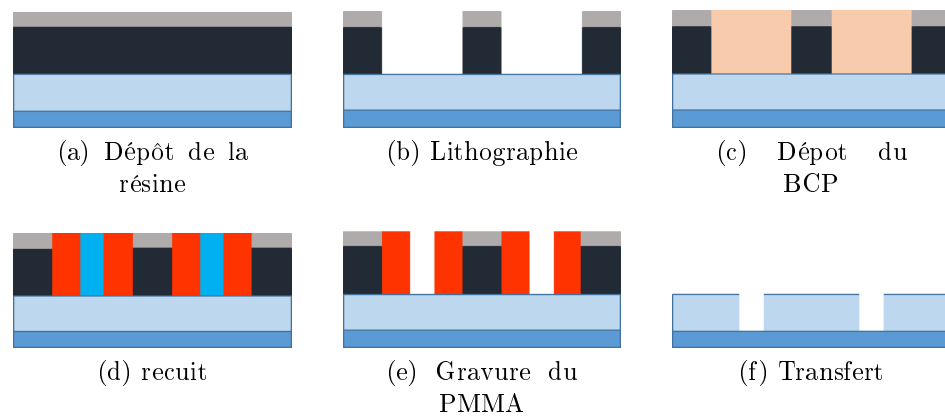


FIGURE 2.11: Etapes du procédé Directed Self-Assembly (DSA).

périodicité des motifs [43]. Il est ainsi possible à l'aide d'un guide de rayon 90 nm d'obtenir un motif dont le rayon est de 20 à 30 nm. Un autre avantage moins évident, est que les erreurs d'impression sont elles aussi réduites. Il est reporté qu'une variation de 7.5 nm sur le rayon de guides circulaires se traduit en une variation de seulement 0.5 nm sur le rayon des domaines de PMMA [44]. Cela en fait un candidat idéal pour l'impression des contacts et des canaux d'inversions des FinFET [45] : la possibilité d'imprimer des motifs plus petits que la résolution des scanners associée à une faible variabilité ainsi qu'un faible coût de revient.

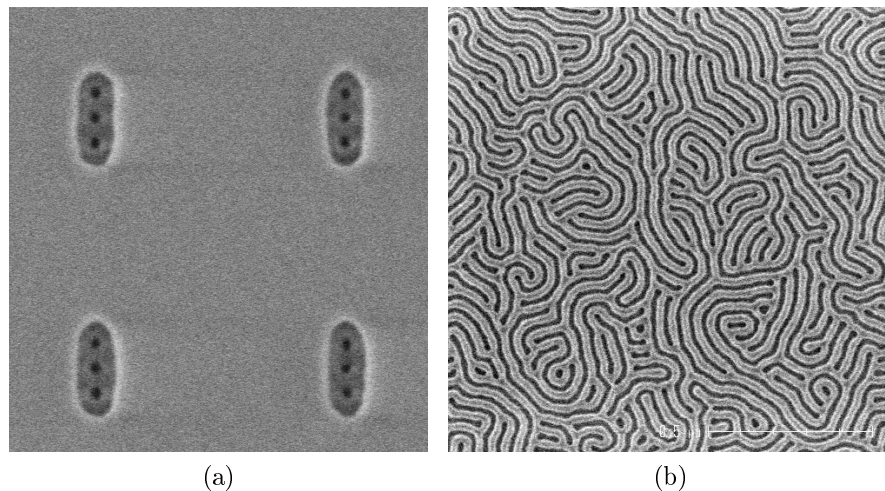


FIGURE 2.12: Images SEM prises après gravure du PMMA. (a) Cas  $f=0.5$  et (b) cas  $f = 0.3$ .

L'utilisation de cette technique entraîne un changement de perspectives au niveau du design : il ne suffit plus de dessiner les motifs, il faut générer les guides pour que les motifs voulus soient conformes au design souhaité.



### 2.2.3 La variabilité

Lors des étapes de fabrications, des sources de variabilité vont affecter les performances des transistors et dans certain cas entrainer leur défaillance [46]. Les paramètres soumis à la variabilité sont dans le monde de la microélectronique considérée comme des variables aléatoires suivant une loi gaussienne et lorsque nous parlerons de la variabilité d'un paramètre, nous ferons référence à l'écart type associé à la variable aléatoire.

Pour une étape de lithographie utilisant un scanner 193 nm à immersion de dernière génération, les principales sources de variabilité lors d'une exposition sont les variations du masque (il est écrit avec une certaine précision, qui peut atteindre aujourd'hui 2 nm), de la dose (quantité d'énergie envoyée par la source lumineuse, la variation typique est de l'ordre de 2.3% autour de la dose nominale) et le focus (hauteur à laquelle l'image se forme, idéalement elle est située au niveau du substrat). La variation de focus est d'environ 60 nm autour du focus nominal. A cela s'ajoute le désalignement entre 2 niveaux, l'*overlay*, qui est donné à 2 nm. Ces variabilités vont avoir un impact important sur l'impression des motifs et donc sur les fonctionnalités qu'il est possible de réaliser. Le transistor étant le principal constituant des puces, ces variations vont impacter les performances de celui-ci.

**Exemple d'impact de la variabilité.** L'intérêt majeur du transistor, principal constituant d'une puce, est de se comporter comme un interrupteur commandé à partir d'une tension. Il est composé de 3 entrées/sorties, la grille, le drain et la source et en appliquant une tension supérieure à une tension seuil, noté  $V_t$ , à la grille, on permet au courant électrique de circuler entre la source et le drain. Dans la situation inverse, il n'y a pas de passage de courant. Plus cette tension seuil  $V_t$  est faible et plus la tension à appliquer pour passer d'un état ouvert à fermé est faible réduisant ainsi l'énergie électrique requise pour faire fonctionner le transistor. En revanche, des courants de fuite peuvent apparaitre si la tension seuil est trop faible, alors que le transistor est sensé être en position ouvert. Ce phénomène va entrainer une consommation électrique non voulue. Nous comprenons donc qu'il existe une tension seuil optimale et qu'il ne faut pas trop s'en écarter pour ne pas affecter les performances du circuit.

L'un des paramètres qui va définir cette tension seuil est la largeur du polycristallin illustrée sur la figure 2.3a. Cette largeur est notée CD (Critical Dimension) poly.

Plus cette largeur est faible et plus la tension seuil sera faible. Ainsi, il existe une plage de largeur pour laquelle la tension seuil est dans la tolérance. La figure 2.13, issue de [47], illustre l'effet d'une variation de CD poly sur la tension seuil. Nous observons qu'une augmentation du CD va entraîner une augmentation moyenne de la tension seuil.

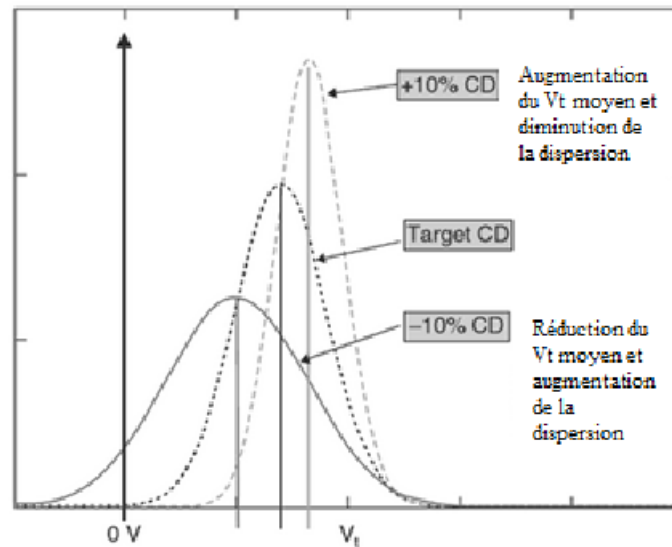


FIGURE 2.13: Répartition de la tension de seuil  $V_t$  en fonction du CD poly. Tiré de [47].

L'impression des motifs n'étant pas parfaite, nous n'obtenons pas une unique valeur de CD poly mais une distribution de valeurs pour un même procédé. Dans le cas du niveau polycristallin, cette dispersion de valeur va directement impacter les performances des transistors. Il faut donc définir une plage de valeurs possible de CD poly pour s'assurer que le motif sera correctement reproduit et que les caractéristiques électriques visées soient belles et bien vérifiées. Tout l'art de la microélectronique est de trouver le bon compromis entre performance souhaitée et technologie disponible. Pour faire ce lien entre le monde du design et le monde de la fabrication, il faut un contrat passé entre les deux qui garantit au designer que ce qu'il dessine est réalisable avec les procédés et les matériaux utilisés en production.

## 2.2.4 Les règles de dessin

Ces contrats sont appelés règles de dessin et vont permettre au designer de dessiner des fonctions électriques tout en garantissant la bonne réalisation du circuit

en production. Elles permettent d'assurer la faisabilité des masques, le bon fonctionnement des puces ainsi que leur fiabilité.

Sur la figure 2.14 est représentée un exemple de règle géométrique qui a été mis en place pour assurer le bon recouvrement entre deux niveaux : le niveau métal chargé d'amener le courant jusqu'aux bornes d'accès aux transistors et le niveau contact qui fait la liaison entre niveau métal et transistor. Cette règle, notée  $DR_1$ , donne l'espacement minimum à donner entre les contacts et le bord des lignes métalliques. Cette règle permet d'absorber, pour une technologie donnée, les variabilités de fabrication et de produire une interconnexion fonctionnelle. Dans le cas de la règle  $DR_1$ , les variabilités prises en compte sont la variabilité CD et gravure du contact et de la ligne ainsi que l'erreur d'alignement. Sans cette règle de dessin, le designer n'aurait aucune garantie que son intention de départ soit correctement reproduite sur silicium. Dans le cas ici représenté, cela correspondrait à obtenir un recouvrement insuffisant et produirait une puce non-fonctionnelle ou peu fiable. Ainsi, en utilisant cette règle, le designer est sûr de la faisabilité des structures qu'il a dessinées, et ce, même dans les cas les plus extrêmes comme illustré en bas de l'image.

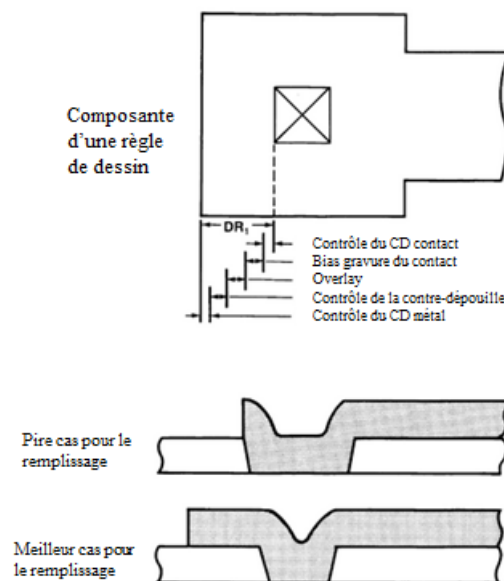


FIGURE 2.14: Définition d'une règle pour le recouvrement entre contact et ligne de metal. Illustration issue de [48].

Dans le cas présenté figure 2.14, la règle de dessin est calculée en faisant la somme des variabilités :

$$DR_1 = \sum_i var_i \quad (2.3)$$

Cette approche surestime l'espacement nécessaire entre le bord de ligne et le contact et on lui préfère maintenant la racine carrée de la somme quadratique des variabilités qui donne une estimation plus optimiste de la marge disponible :

$$DR_1 = \sqrt{\sum_i var_i^2} \quad (2.4)$$

Ainsi si la densité est critique, le calcul quadratique est privilégié. Cette formule est utilisée car on suppose que les paramètres sont des variables aléatoires gaussiennes et indépendantes. Dans ce contexte, si nous avons par exemple 2 paramètres géométriques  $A$  et  $B$  qui sont des variables gaussiennes indépendantes d'écart type  $\sigma_A$  et  $\sigma_B$ , alors la variable aléatoire  $A + B$  suivra une loi gaussienne d'écart type  $\sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$ .

Nous verrons dans cette étude qu'une troisième approche est possible et repose sur des tirages aléatoires. Le principe consistera à faire varier l'ensemble des paramètres en jeu pour obtenir une distribution de valeurs qui donne des informations bien plus fine qu'une somme de variabilités.

Quelle que soit la méthode de calcul utilisée, ces règles de dessin vont dépendre des procédés technologiques étudiés, des matériaux considérés et des performances électriques souhaitées. En particulier, elles vont être plus ou moins contraignantes en fonction du procédé lithographique utilisé pour l'impression des motifs.

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à la mise en production d'un niveau appelé Vertical Interlayer Access (VIA), qui est un plan d'interconnexion entre deux niveaux métalliques, pour le noeud technologique 10 nm. Pour ce faire, il faut dans un premier temps choisir les procédés technologiques utilisés et dans un second temps mettre au point des règles de dessin spécifiques pour assurer le bon fonctionnement de ces interconnexions.

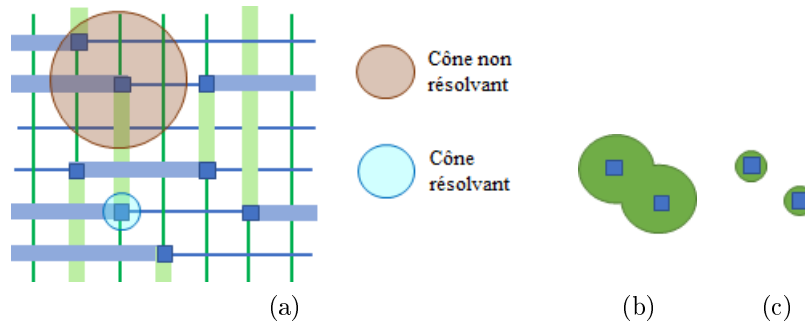


FIGURE 2.15: (a) Illustration d'une grille régulière et d'une possibilité de design. En vert sont représenté les lignes métalliques du niveau bas, en bleu les lignes métalliques du niveau haut et les carrés bleu représentent les vias permettant la connexion des 2 niveaux. La résolution du scanner utilisé est illustré en marron. (b) Résultat du design illustré en bleu sur silicium, représenté en vert dans le cas non résolu et (c) dans le cas résolu.

### 2.3 Niveau d'interconnexion 10 nm

Pour les noeuds technologiques avancés, nous considérons une grille de dessin régulière pour pallier aux contraintes liées à la densification des circuits, offrant ainsi plus de robustesse pour les procédés d'impressions [49–52]. La figure 2.15 illustre une telle grille où le niveau métallique X est orienté verticalement et où le niveau X+1 est orienté horizontalement. Ainsi les VIAs faisant la jonction entre ces deux niveaux sont placés sur une grille régulière. Nous noterons par la suite  $p_x$  la périodicité spatiale de la grille sur le niveau X et  $p_y$  sur le niveau X+1.

Le cône d'interaction optique, de rayon  $R_{résolution}$ , est représenté en marron sur la figure 2.15. C'est un disque qui représente la résolution maximale atteignable par un système optique. Si des motifs se trouvent sous ce disque, il n'est pas possible de les résoudre optiquement et il est nécessaire d'employer des techniques plus performantes telle que la lithographie par division de pas de réseau pour parvenir à les imprimer correctement.

Pour le noeud technologique 10 nm, les périodicités spatiales  $p_x$  et  $p_y$  sont égales à 48 nm et les lignes métalliques ont une largeur de 24 nm. En utilisant le meilleur scanner actuellement disponible en production, composé d'une source de longueur d'onde 193 nm d'ouverture numérique 1.35, nous avons vu qu'il était possible d'atteindre des périodicités de l'ordre de 80 nm, ce qui est insuffisant au vu des dimensions à atteindre. Nous sommes donc obligés d'utiliser des techniques d'impressions alternatives. Parmi celles présentées, nous avons fait le choix du procédé SIT pour faire l'impression des lignes métalliques, bien que ça ne sera pas le point

d'étude de la thèse et le DSA pour l'impression des VIA. Ce choix est poussé pour deux raisons principales. La première est d'ordre économique, il est en effet bien plus avantageux d'utiliser des équipements déjà existants et utilisés en production et aussi de limiter le nombre de masques requis. La deuxième porte sur le contrôle de la variabilité qui est meilleur avec ces 2 méthodes.

## 2.4 Objectifs de la thèse

Notre objectif, pour cette thèse, est d'établir les règles de dessin pour le noeud 10 nm, en utilisant le procédé DSA pour l'impression du niveau VIA. Nous allons en particulier, valider le procédé en nous basant sur un critère statistique de fiabilité.

Le principal défi qui nous attend, est le contrôle des variabilités qui vont impacter le positionnement des motifs. La première source de variabilité provient de la fabrication du matériau lui-même : les copolymères sont obtenus à l'aide de réactions chimiques consistant à agréger des monomères ensemble pour former des chaînes qui vont être de plus en plus longues. Cette opération, bien que contrôlée, va produire des chaînes dont la taille suivra une distribution statistique et les fournisseurs de copolymères ont la tâche de réduire au maximum la largeur de cette distribution [53]. La deuxième source de variabilité concerne les effets thermodynamiques : des fluctuations, même infimes, des conditions initiales vont modifier les domaines qui seront générés. Enfin, la troisième source de variabilité est liée à l'impression des guides car le DSA est très sensible aux variations du guide. Cette variation n'est pas en terme de dimensionnel, puisqu'elle est très faible, mais en terme de déplacement du motif.

Ces variabilités ne vont pas seulement impacter la largeur des motifs imprimés, mais aussi leur positionnement. La figure 2.16 illustre cet aspect : le guide idéal en vert va produire des motifs qui seront correctement positionnés, alors que le guide déformé en rouge va engendrer des motifs qui ne seront pas bien placés par rapport au design.

Avec un procédé lithographique standard, la variabilité va impacter uniquement la largeur des motifs, et non leur positionnement : ils seront toujours centrés par rapport au design. De plus, la vérification des règles de dessin est, dans le cas classique, directe, puisqu'il suffit de faire des mesures sur les structures qui sont

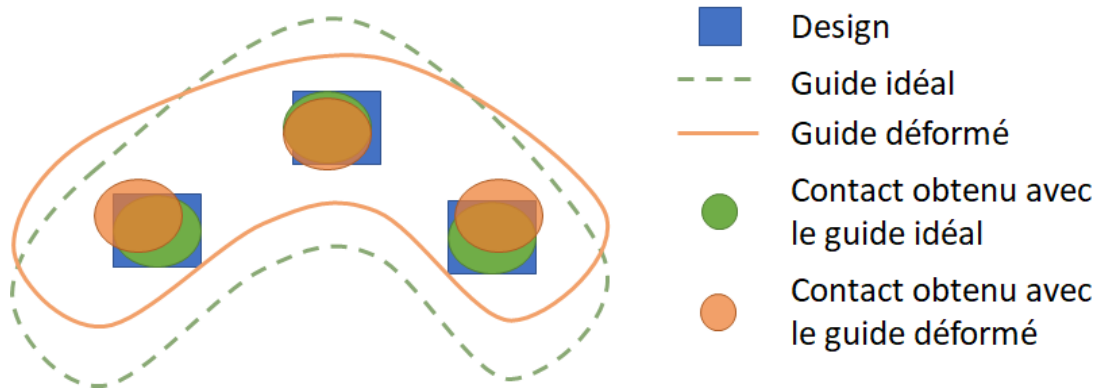


FIGURE 2.16: Illustration de l'impression de contacts à l'aide du procédé DSA. Le design à imprimer est illustré en bleu. En vert est illustré le guide idéal qui va produire des contacts correctement positionnés par rapport au design. En rouge est illustré un guide déformé qui va produire des contacts qui ne sont pas correctement placés.

dessinées. Dans le cas du DSA, la vérification est indirecte puisque c'est le guide qui va définir l'emplacement des structures finales et non le design initial.

C'est là que réside toute la difficulté de l'emploi du procédé DSA comme méthode d'impression et il n'existe aucune solution permettant de garantir la bonne impression des motifs en utilisant le DSA. Les solutions existantes ne prennent en compte que l'aspect variation de largeur des motifs et sont basées sur des vérifications directes, ce qui ne convient pas dans le cadre du DSA. Tout l'enjeu de la thèse va être d'établir des règles de dessin spécifiques au DSA qui vont permettre d'absorber les variabilités qui sont propres à ce procédé pour l'impression du niveau VIA.

Cette thèse s'articule autour de 3 chapitres : le premier portera sur le critère statistique, le deuxième traitera de l'étude expérimentale des variabilités. Dans la dernière partie nous établirons des règles de dessin pour garantir le critère de fiabilité.

**Chapitre 3 : Critère de fiabilité** Dans ce chapitre nous étudierons en détail le critère qui permet d'assurer la bonne interconnexion entre lignes métalliques et VIA. Nous allons le traduire en une erreur systématique maximale admissible entre VIA et lignes. Cette erreur systématique sera plus simple à utiliser que le critère initial et sera d'une grande aide dans l'établissement des règles de dessin.

**Chapitre 4 : Analyse expérimentale des variabilités** L'obtention expérimentales des variabilités est obtenu à l'aide d'image SEM (Scanning Electronic Microscope) de structures unidirectionnelles. Les solutions commerciales ne proposant pas d'analyse sur des structures plus complexes, nous présenterons de nouvelles techniques qui permettent de s'affranchir de ce défaut.

**Chapitre 5 : Etablissement des règles de dessin** Nous allons appliquer les éléments décrit aux chapitres 3 et 4 pour proposer un ensemble de règles de dessin permettant de vérifier le critère de fiabilité. Pour cela, une méthodologie a été conçue pour la génération de structures de tests et un processus aléatoire de vérification a été mis au point pour s'assurer de la validité des règles.

Enfin le chapitre 5 présente la conclusion ainsi que les perspectives de ce travail.



# Chapitre 3

## Critère de fiabilité

### 3.1 Règle de dessins

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les règles de dessin représentent les limites de ce qu'il est possible d'obtenir comme composants avec une technologie donnée. Il s'agit d'un compromis entre :

- les performances et la densité du circuit.
- la réalisation technique du circuit par des procédés technologiques qui ne permettent pas d'imprimer toutes les configurations avec succès.

Nous comprenons donc que la course à la miniaturisation passe par une réduction des largeurs minimum et des espacements minimum et donc par de simples modifications ou ajouts de règles au fur et à mesure de la progression des procédés utilisés.

En diminuant la taille des motifs, leur impression est de plus en plus sensible aux variabilités des procédés. La figure 3.1a montre un motif bien résolu, en revanche, il existe des conditions procédées ne permettant pas d'imprimer correctement ce même motif 3.1b. Pour éviter ces distorsions et prendre en compte l'aspect rendement qui est directement relié aux capacités de production, il est nécessaire d'en tenir compte lors de l'établissement des règles de dessin.

Dans ces travaux de thèse, nous nous sommes intéressés à l'établissement de règles pour assurer la bonne impression des liaisons entre lignes métalliques et les VIAs (pour Vertical Interlayer Access) qui en font la liaison. En particulier, nous avons

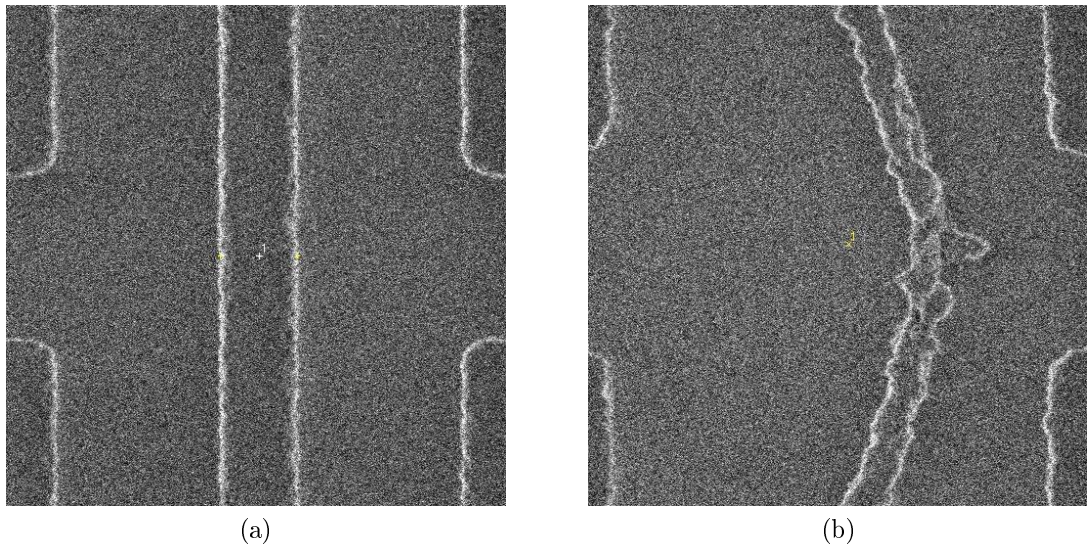


FIGURE 3.1: Exemple d'un même motif imprimé à des conditions procédés différentes. (a) Le motif est correctement imprimé en condition nominale. (b) Le motif n'est plus correctement imprimé lorsqu'on s'éloigne de la condition nominale.

considéré un critère statistique se basant sur l'aire de recouvrement entre d'une part le VIA et d'autre part la ligne métallique. La section suivante détaille ce problème lié aux problèmes de recouvrement entre VIAs et lignes métalliques.

## 3.2 Fiabilité des interconnexions

Un circuit intégré est composé de plusieurs niveaux et peut être décomposé en deux types de niveaux : les niveaux Front End qui définissent les composants actifs d'un circuit et les niveaux Back End qui assurent la connexion des composants actifs entre eux ainsi que leur alimentation. Les niveaux qui nous intéressent, à savoir les lignes métalliques et les VIA font partie du Back End.

L'augmentation du nombre et de la densité des composants actifs dans un circuit intégré a entraîné l'augmentation du nombre de niveaux Back End ainsi que leur complexité. Ce faisant, le nombre de défauts parasites a augmenté :

- Phénomène de couplage entre des lignes métalliques proches (plus couramment appelé crosstalk).
- Temps de parcours des signaux électriques trop élevés dans certaines portions du circuit entraînant un problème de synchronisation.

Pour limiter ces effets, de nombreuses parades existent. Par exemple, la mise en place des règles de dessin qui vont imposer une distance minimale entre deux lignes métalliques permet de limiter le crosstalk et les claquages : il existe une tension de seuil au delà de laquelle un courant indésirable apparaît, entraînant la destruction de la puce. Plus la largeur minimale augmente, et plus la tension seuil augmente. Il est aussi possible de changer de matériaux. Par exemple, en 1997 IBM remplaça l'aluminium par du cuivre pour diminuer la résistivité [54].

Ces parades permettent le bon fonctionnement du dispositif et évitent une défaillance du produit. Il est à noter qu'il existe une défaillance de type prématurée où le produit ne fonctionne pas lors de sa première utilisation et une défaillance due au vieillissement du produit. La défaillance précoce est généralement liée à des problèmes de fabrication et l'amélioration des procédés et des design permet de s'en prémunir [55].

Parmi les phénomènes qui peuvent entraîner une dégradation du circuit intégré et qui vont limiter sa durée de vie, il en existe quatre principaux :

- **La corrosion** qui va altérer les lignes métalliques par réaction chimique. L'atmosphère étant un milieu oxydant, le cuivre et l'aluminium présents dans les interconnexions sont susceptibles de subir une corrosion. Pour éviter cet écueil, les circuits sont encapsulés (par passivation).
- **Les contraintes mécaniques** qui sont liées aux changements de température subis par le produit. Pour réaliser tous les niveaux d'un circuit, des cycles de températures sont effectués et vont introduire des contraintes mécaniques dans le produit.
- **L'électromigration** qui désigne le transport de matière induit par le passage d'un courant électrique. Au niveau des interconnexions, l'électromigration peut engendrer soit un défaut de matière en certains points (et donc entraîner une augmentation de la résistance de la ligne et éventuellement sa coupure) ou au contraire un excès de matière (ce qui peut entraîner du crosstalk et éventuellement un phénomène de claquage).
- **Les claquages diélectriques** qui peuvent survenir entre contacts. Lorsque le champ électrique entre les contacts est suffisamment grand ou l'écart entre contacts insuffisant, le matériau isolant séparant les contacts peut devenir conducteur provoquant ainsi un arc électrique.

Dans le cadre de la thèse, nous nous sommes intéressés à l'un de ces mécanismes, l'électromigration. Des études internes ont établi un critère pour limiter son impact

sur le circuit que nous allons détailler dans la section suivante.

### 3.3 Critère de fiabilité : recouvrement entre lignes et VIA

Le critère statistique pour limiter la dégradation des connexions par l'électromigration est le suivant :

99,99366% des connexions entre un niveau de lignes métalliques et un niveau VIA doivent avoir une aire de recouvrement supérieure à une limite donnée. Ce critère permet de garantir la fiabilité des composants dans le temps : 1 interconnexion parmi 1 000 000 sera défectueuse après 10 ans.

Cette aire de recouvrement limite a été prise comme étant égale à 40 % de l'aire nominale qui est obtenue pour les conditions nominales de procédés.

#### 3.3.1 Calcul analytique : cas idéal d'un VIA rond

Il faut bien comprendre que l'impression de tout motif sur un substrat est sujette à des variabilités qui vont avoir comme conséquence une différence entre le dessin souhaité et le dessin final. Dans le cas d'une ligne métallique 3.2a et d'un VIA 3.2b, cela va se traduire par une variabilité sur la largeur  $W$  de la ligne ainsi que sur le rayon  $R$  du VIA. En outre, dans des conditions parfaites, l'impression du VIA au-dessus de la ligne doit amener à un système parfaitement aligné comme représenté figure 3.2c, or il n'en n'est rien. Il existe un décalage  $d$  entre les deux motifs comme illustré figure 3.2d. Ce décalage correspond à un désalignement des masques des deux niveaux entre eux.

En observant ces figures, on voit qu'une modification de l'un des paramètres  $W$ ,  $R$  ou  $d$  va modifier l'aire de recouvrement de la connexion. Cette aire de recouvrement notée  $A$  peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$A(W, R, d) = \frac{R^2}{2}(\theta_b - \theta_a - (\sin\theta_b - \sin\theta_a)) \quad (3.1)$$

avec

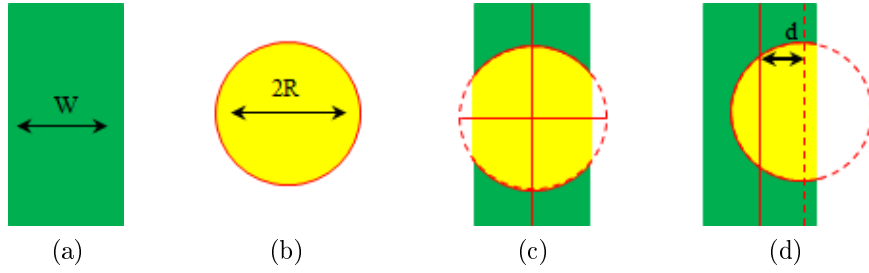


FIGURE 3.2: Jonction entre une ligne métallique (a) et un VIA (b). Représentation de la configuration optimale (c) et d'une configuration altérée (d).

$$\theta_a = 2\arccos((W/2 - d)/R) \text{ et } \theta_b = 2\arccos(-(W/2 + d)/R) \quad (3.2)$$

et en posant  $\arccos(x < -1) = \pi$  et  $\arccos(x > 1) = 0$ . En regardant la figure 3.3a, on observe que pour une largeur  $W$  et un rayon  $R$  donné, il existe un décalage seuil pour lequel l'aire de recouvrement normalisée devient inférieure à notre tolérance, que l'on note  $\alpha$ , fixée à 40%. Ce décalage seuil est noté  $d_{seuil}$  sur la figure.

En posant  $A_N$  comme étant notre aire nominale, le décalage seuil  $d_{seuil}$  est alors obtenu en résolvant l'équation :

$$A(W, R, d_{seuil}) = \alpha A_N \quad (3.3)$$

Pour des valeurs trop petites de  $W$  et/ou de  $R$  l'équation 3.3 ne présente pas de solution dans le cas où  $0 < \alpha \leq 1$ . Par exemple, sur la figure 3.3a, la courbe bleue possède deux solutions mais la courbe orange n'a pas de solution pour cette équation. Obtenir une solution analytique à cette équation serait d'une aide précieuse pour vérifier le critère de stabilité. En effet, si nous pouvions connaître la répartition statistique des aires de recouvrement, il serait alors possible d'obtenir le nombre de jonctions dont le décalage  $d$  est supérieur au décalage seuil  $d_{seuil}$ .

### 3.3.2 Impact des variabilités

Les variables  $W$ ,  $R$  et  $d$  sont des variables aléatoires qui sont distribuées selon une loi quelconque. Dans ce cadre, pour un  $W$  et un  $R$  donnés, la probabilité  $P(A \geq \alpha A_N)$  pour que l'aire de recouvrement soit supérieure à notre seuil est égale

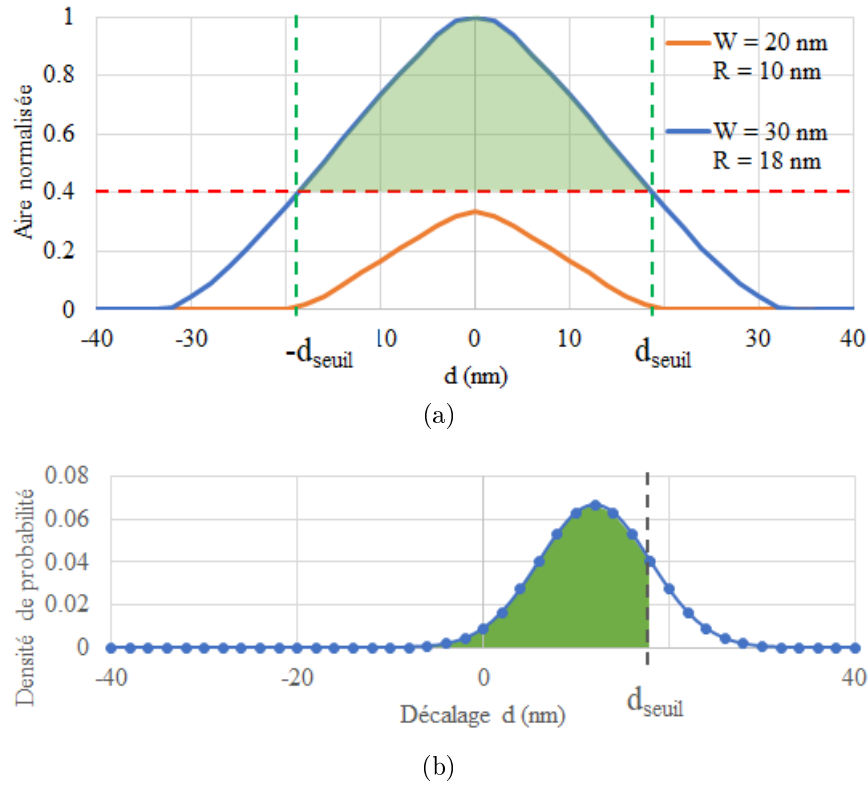


FIGURE 3.3: (a) Evolution de l'aire de recouvrement normalisée en fonction du décalage  $d$  pour deux valeurs de rayons et de largeurs. La ligne rouge indique la tolérance sur l'aire de recouvrement. (b) Loi de distribution de la variable aléatoire. L'aire verte représente la probabilité pour que l'aire normalisée soit supérieure à notre critère de 40%. Dans notre cas cette aire est égale à 0.87, ainsi le critère de fiabilité n'est pas vérifié.

à  $F_d(d_{seuil}) - F_d(-d_{seuil})$ , où  $F_d$  est la fonction de répartition de la variable aléatoire  $d$ . Ainsi, nous avons à nous assurer que le nombre obtenu est bien supérieur à 0.9999366 pour vérifier le critère de fiabilité. Pour le moment, aucune hypothèse n'est faite sur la loi de distribution de  $d$ .

Dans le cas illustré à la figure 3.3a et à titre d'exemple, le décalage seuil est égale à 18.76 nm pour une ligne de largeur 30 nm et un VIA de rayon 18 nm. En supposant que  $d$  suit une loi normale de moyenne  $m_d$  de 12 nm et d'écart type  $\sigma_d$  de 6 nm, alors la probabilité  $P(A \geq \alpha A_N)$  est alors égale à 87%. Nous sommes loin du critère qui impose une probabilité supérieure à 99,99366%! Cette probabilité est donnée par l'aire verte représentée sur le graphique 3.3b.

Généralement la variabilité  $\sigma_d$  est un paramètre fixe pour un procédé donné et qu'il peut être assez difficile de le modifier. En revanche, le paramètre  $m_d$  peut être ajusté en imposant des règles de dessin. Si on reprend notre probabilité  $P(A \geq \alpha A_N)$ , celle-ci est fonction de  $m_d$  et de  $\sigma_d$  :  $P(A \geq \alpha A_N) = P(\sigma_d, m_d)$ .

De plus, pour  $m_d \geq 0$  et  $\sigma_d \geq 0$ , la fonction est décroissante en  $m_d$  et en  $\sigma_d$  et a comme borne inférieure 0.

Nous pouvons donc conclure que les couples  $(\sigma_d, m_d)$  pour lesquels le critère de fiabilité est vérifié sont les couples en dessous de la courbe de niveau  $P(\sigma_d, m_d) = 0.9999366$ . Cette courbe est représentée en bleu sur le graphe 3.4 et l'aire verte montre tous les couples qui permettent de passer le critère de fiabilité. Nous observons sur ce graphique que plus la variabilité  $\sigma_d$  est importante et plus l'écart systématique tolérable  $m_d$  est petit.

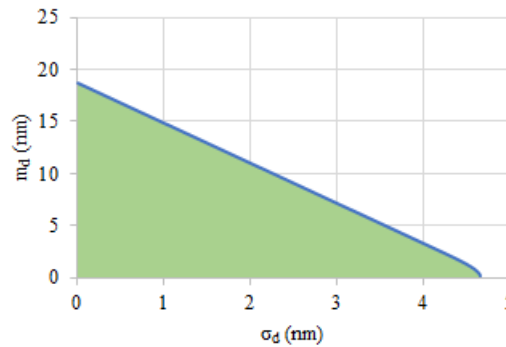


FIGURE 3.4: Evolution du déplacement maximal admissible en fonction de la variabilité. La courbe bleu représente la courbe de niveau  $P(\sigma_d, m_d) = 0.9999366$ . L'aire verte représente tous les couples  $(\sigma_d, m_d)$  pour lesquels  $P \geq 0.9999366$ .

Dans le calcul précédent, nous n'avons pas pris en compte certains aspects :

- La variation de largeur de la ligne.
- La variation du rayon du contact.
- Le contact ainsi que la ligne peuvent ne pas être des formes parfaites.

Dans la sous-section suivante nous allons voir comment prendre en compte ces aspects pour assurer le critère de fiabilité. Globalement nous définirons un cadre qui permettra d'obtenir le graphique de la figure 3.4 en prenant en compte tous les aspects ce qui permettra pour une variabilité  $\sigma_d$  donnée, d'obtenir un déplacement maximal autorisé  $m_d$  afin de vérifier notre critère de fiabilité.

### 3.4 Traduction du critère statistique

Comme mentionné précédemment, il faut prendre en compte les variations de largeur  $\sigma_W$  de la ligne et les variations de rayon  $\sigma_R$  du contact et nous les considérons

par la suite fixe. Ainsi, si sur notre circuit nous avons  $N$  jonctions et que nous notons  $A_i(w_i, r_i, d_i)$  les paramètres géométriques de la jonction, alors notre critère de fiabilité revient à calculer la fraction de jonction dont l'aire normalisée  $A_i$  est supérieure à 40% et s'assurer que ce nombre est supérieur à 0.9999366.

Nous nous plaçons dans l'espace à 3 dimensions définis par les paramètres géométriques de la jonction  $w$ ,  $r$ ,  $d$ . En observant que l'aire de recouvrement est croissante en  $w$  et en  $r$  et décroissante en  $d$ , le volume intérieur défini par la surface d'équation  $A(w, r, d) = \alpha A_N$  est topologiquement équivalente à une sphère. Ainsi, en connaissant la répartition des variables  $w$ ,  $r$  et  $d$ , il est possible de calculer la probabilité d'avoir une jonction à l'intérieur du volume. Pour ce faire, plusieurs méthodes existent et nous allons écarter immédiatement la solution analytique car, si elle est utilisable dans notre cas, elle ne pourra pas être adaptée aux cas plus complexes.

La méthode employée consiste, en tirant aléatoirement des paramètres  $w$ ,  $r$  et  $d$  à évaluer le rapport entre le nombre de jonctions à l'intérieur du volume par rapport au nombre total de tirage. Cette méthode est plus connue sous le nom de méthode de Monte Carlo [56].

### 3.4.1 Méthode Monte-Carlo pour la prise en compte des variabilités

Nous écrivons  $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$  la loi normale de moyenne  $\mu$  et d'écart type  $\sigma$ . En considérant que nos variables aléatoires  $W$ ,  $R$  et  $D$  suivent chacune une loi normale, on peut écrire :

$$\begin{aligned} W &\sim \mathcal{N}(\mu_W, \sigma_W^2) \\ R &\sim \mathcal{N}(\mu_R, \sigma_R^2) \\ D &\sim \mathcal{N}(\mu_D, \sigma_D^2) \end{aligned} \tag{3.4}$$

L'algorithme consiste à tirer de manière aléatoire des valeurs de largeurs  $w$ , de rayons  $r$  et de déplacements  $d$  tout en respectant les distributions statistiques associées. Nous obtenons ainsi des couples de paramètres  $(w_i, r_i, d_i)$  dont on peut calculer l'aire de recouvrement associée. Il est alors possible de calculer le ratio entre le cardinal de l'ensemble  $\{A_i \geq \alpha A_N\}$  et le nombre total de jonctions  $N$ .



Ce ratio représente la probabilité d'obtenir une jonction avec une aire supérieure à notre seuil égal à  $\alpha A_N$ .

Pour tirer les nombres de manière aléatoire en suivant une distribution, nous avons choisi une méthode très simple qui consiste à tirer aléatoirement de manière uniforme entre 0 et 1 un nombre  $f$ , puis à trouver la variable  $x$  telle que  $F(x) = f$ . En répétant le procédé, on obtient une suite de valeurs aléatoires  $x_i$  qui suit la loi de distribution choisie. Dans notre cas la fonction de répartition est donnée par :

$$F_{\mu,\sigma}(x) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \frac{x - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right] \quad (3.5)$$

Il existe des méthodes plus efficaces mais celle-ci à l'avantage de s'adapter à n'importe quelle distribution pour peu que l'on connaisse sa fonction de répartition.

Une fois les nombres  $(w_i, r_i, d_i)$  déterminées précédemment, il ne reste plus qu'à calculer l'aire  $A(w_i, r_i, d_i) = A_i$  et enfin à calculer le ratio de jonctions convenables :

$$P = \frac{\operatorname{card}(\{A_i \geq \alpha A_N\})}{N} \quad (3.6)$$

En ayant fixé les paramètres  $m_W, \sigma_W, m_R$  et  $\sigma_R$ , le ratio  $P$  n'est fonction que de  $m_D$  et de  $\sigma_D$ . Comme précédemment, il est donc possible de trouver les couples  $(m_D, \sigma_D)$  tel que  $P(m_D, \sigma_D) = 0.9999366$  et ainsi nous permettre pour une variabilité  $\sigma_D$  donnée de connaître l'écart maximal tolérable.

#### 3.4.1.1 Le cas idéal

Une première vérification consiste à fixer des valeurs arbitraires  $m_W = 30$  nm,  $\sigma_W = 0$  nm,  $m_R = 18$  nm et  $\sigma_R = 0$  nm et à vérifier que l'on obtient bien les mêmes résultats que ceux obtenus avec la méthode analytique. En utilisant 100000 tirages, l'écart moyen entre les valeurs d'écart maximal tolérable est de seulement 0.01 nm, ce qui est très faible.

#### 3.4.1.2 Le cas général

Jusqu'à présent nous avons considéré une ligne et un contact idéal, c'est à dire un rectangle infiniment long pour la ligne et un cercle parfait pour le contact. Or dans

les faits, le contact et la ligne ne sont pas des figures géométriques parfaites comme illustré figure 3.5b. Cela s'explique par la présence d'autres motifs à proximité qui vont perturber son impression. En outre, contrairement au cas idéal, il faut aussi prendre en compte le fait qu'une variation du déplacement sur l'axe vertical va potentiellement entraîner une modification de l'aire de recouvrement.

Dans cette section nous allons voir comment traiter ce cas. En particulier, nous verrons que le seul changement requis est l'ajout d'une nouvelle variable aléatoire ainsi que d'une nouvelle méthode de calcul de  $A$ .

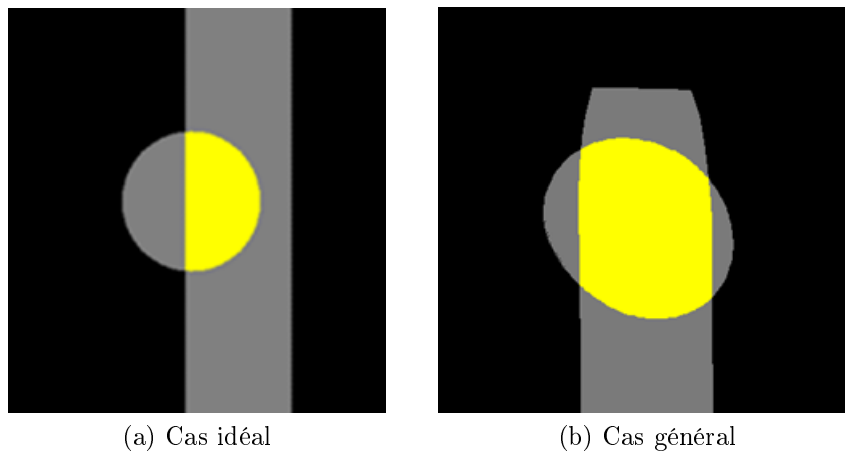


FIGURE 3.5: Exemple de jonctions à condition nominale. L'aire de recouvrement entre la ligne et le contact est illustrée en jaune.

Cette fois on distingue le déplacement du contact par rapport à la ligne à la fois sur l'axe  $x$  et sur l'axe  $y$ . Nous avons donc deux nouvelles variables aléatoires  $D_x$  et  $D_y$  qui viennent remplacer la variable aléatoire  $D$ . En revanche nous supposons que ces deux variables aléatoires suivent la même loi normale. L'aire de recouvrement  $A$  est dans ce cas fonction de  $w$ ,  $r$ ,  $d_x$  et  $d_y$ .

Les cas réels ne sont pas seulement des versions altérées et éventuellement déplacées de primitives comme des rectangles ou des ellipses. Pour plus de précision sur les calculs, nous utiliserons des simulations de lignes et contacts plus réaliste comme celui de la figure 3.5b. Les deux images ayant la même résolution. Les simulations sont issues de modèles optiques commerciaux. Les paramètres du modèles sont calibrés sur des expérimentations et la précision obtenue, qui est donnée en erreur quadratique moyenne, est de 3 nm.

Nous noterons par la suite  $IL_w$  l'image de la ligne de largeur  $w$  et  $IC_r$  l'image du contact de rayon  $r$ . L'intersection des deux images  $IL_w \cap IC_r$  est représentée

en jaune sur la figure 3.5 et l'aire correspondante  $A$  est donnée par le nombre de pixels de cet ensemble multiplié par la résolution d'un pixel au carré. Nous avons donc :

$$A = \text{card}(\text{IL}_w \cap \text{IC}_r) R_{\text{pixel}}^2 \quad (3.7)$$

Avec  $R_{\text{pixel}}$  la résolution d'un pixel en nm.

Nous avons postulé précédemment que les variables  $w$  et  $r$  suivaient une loi normale. Nous pouvons donc écrire  $w$  comme étant égale à la somme d'une partie constante  $w_0 = \mu_w$  (sa moyenne) et d'une partie aléatoire  $\Delta w$  qui suit une loi normale de moyenne nulle et d'écart type  $\sigma_W$  :  $w = w_0 + \Delta w$ . Nous avons la même chose pour  $r$  :  $r = r_0 + \Delta r$ .

Si  $\Delta w < 0$ , on parle d'érosion et si  $\Delta w > 0$ , on parle alors de dilatation et nous noterons  $s_x$  l'opération morphologique associée à une variation de taille  $x$ . Cette opération représente donc selon le signe de  $x$ , soit une érosion, soit une dilatation. Avec cette notation, nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned} \text{IL}_{w=w_0+\Delta w} &= s_{\Delta w}(\text{IL}_{w_0}) \\ \text{IC}_{r=r_0+\Delta r} &= s_{\Delta r}(\text{IC}_{r_0}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Nous noterons aussi  $t_{x,y}$ , l'opérateur qui à une image  $I$  associe sa translatée de vecteur  $(x, y)$ . Par exemple, si nous écrivons  $I = t_{x,y} \circ s_{\Delta r}(\text{IC}_{r_0>0})$ , nous indiquons que l'image  $I$  a d'abord subi une dilatation et qu'elle a été ensuite translatée suivant le vecteur  $(x, y)$ .

Maintenant nous avons tous les ingrédients nécessaires pour calculer l'aire de recouvrement d'une jonction en utilisant des images et en prenant en compte les possibles changements de géométrie ainsi que l'erreur de placement entre les deux images. Pour obtenir suffisamment de données statistiques, nous allons répéter les trois étapes suivantes :

**Première étape** Nous tirons de manière aléatoire un vecteur représentant les paramètres géométriques de la jonction  $\vec{J} = (w', r', d_x, d_y)$  que l'on réécrit  $\vec{J} = (w + \Delta w, r + \Delta r, d_x, d_y)$  pour avoir les variations autour des images initiales.

**Deuxième étape** Nous appliquons les transformations géométriques sur les images initiales. Dans notre cas cela donne deux images  $I_1$  et  $I_2$  obtenues en faisant les opérations suivantes :

$$\begin{aligned} I_1 &= t_{d_x, d_y} \circ s_{\Delta w}(\text{IL}_{w_0}) \\ I_2 &= s_{\Delta r}(\text{IC}_{r_0}) \end{aligned} \quad (3.9)$$

**Troisième étape** Calcul de l'aire de recouvrement entre les deux images  $I_1$  et  $I_2$  :  $A = \text{card}(I_1 \cap I_2) R_{\text{pixel}}^2$ .

En effectuant un grand nombre de ces tirages, nous obtenons une distribution d'aire de recouvrement et nous sommes en mesure d'évaluer le pourcentage de structures ayant une aire de recouvrement supérieure à  $\alpha A_N$  notre aire seuil. Nous souhaitons évidemment que ce pourcentage soit supérieur à notre tolérance de 99.99366 %.

### 3.4.2 Etablissement d'un critère de déplacement systématique

Pour un procédé d'impression des lignes données, nous connaissons la valeur de variabilité  $\sigma_W$  et pour un procédé d'impression de contact donné, nous connaissons  $\sigma_R$  et à priori  $\sigma_d$  en connaissant l'erreur d'alignement entre les deux niveaux.

Une fois ces paramètres connus, nous pouvons effectuer un tirage monte carlo comme précédemment décrit pour déterminer le pourcentage de connexions défectueuses pour une valeur de déplacement moyen  $m_d$  quelconque.

Sur la figure 3.6 est représentée l'évolution du pourcentage de connexions problématiques en fonction de  $m_d$  pour des valeurs de variabilités  $\sigma_W$  de 1.2 nm,  $\sigma_R$  de 0.75 nm et  $\sigma_d$  de 2.8 nm qui sont les valeurs obtenues en utilisant le DSA pour l'impression des VIAs et le SIT pour l'impression des lignes. Il faut comprendre que pour chaque point du graphe correspond un ensemble de tirages aléatoires pour un set de PA donnée  $(m_d, \sigma_d, m_W, \sigma_W, m_R, \sigma_R)$ .

Dans le cas idéal, nous observons qu'au delà de  $m_d = 3.9$  nm, le pourcentage de connexions défectueuses (dont l'aire est inférieure à 40% de notre aire nominale) devient supérieur à 0.00633% et nous ne vérifions donc plus le critère statistique.

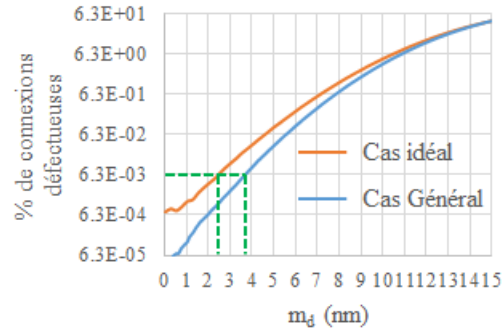


FIGURE 3.6: Evolution du pourcentage de connexions ayant une aire inférieure au critère de recouvrement en fonction du déplacement moyen  $m_d$  pour des valeurs de variabilité  $\sigma_W = 1.2$  nm,  $\sigma_R = 0.75$  nm et  $\sigma_d = 2.8$  nm

Nous avons donc traduit notre critère statistique sur l'aire de recouvrement en un critère portant sur l'erreur de placement moyen qui ne doit pas dépasser une valeur seuil  $d_{max}$  qui dans le cas idéal est de 3.9 nm. Sur le même graphique, nous voyons que le déplacement moyen maximal admissible est de 2.5 nm.

### 3.4.3 Définition des règles de dessin

Nous venons d'établir que, nous imposons une erreur de déplacement maximal  $d_{max}$  entre le centre du VIA tel que prévu par le design et le VIA simulé, nous garantissons que 99,99366% des structures aient une aire de recouvrement suffisante. Or sans règles de dessin, des configurations vont engendrer une erreur sur le placement du contact supérieur à notre critère  $d_{max}$  et donc engendrer des problèmes de fiabilité.

Une fois ce critère connu, nous pouvons créer des structures de tests et vérifier sur ces structures, si l'erreur de placement entre le design et le contact prédit est inférieure à  $d_{max}$ . Dans le cas contraire, la structure est interdite en créant une règle de dessin. Dans un monde parfait, nous serions capable de générer un ensemble exhaustif de structures de tests mais cela demanderait des ressources dont nous ne disposons pas. Nous allons voir au chapitre 4, dans le cas particulier du DSA, comment nous avons créé de manière intelligente ces structures.

Prenons le cas du design illustré figure 3.7a. Pour savoir si cette configuration respecte notre critère de fiabilité, nous devons simuler comment les VIA seront imprimés sur le substrat. Cette étape, dans le cas du DSA, est visible à la figure 3.7b. Enfin, pour chaque VIA  $i$ , nous calculons la distance  $d$  entre le design et

la simulation comme illustré figure 3.7c. Finalement, si l'une de ces distances est supérieure à notre critère  $d_{max}$ , la configuration est interdite à l'aide d'une règle de dessin.

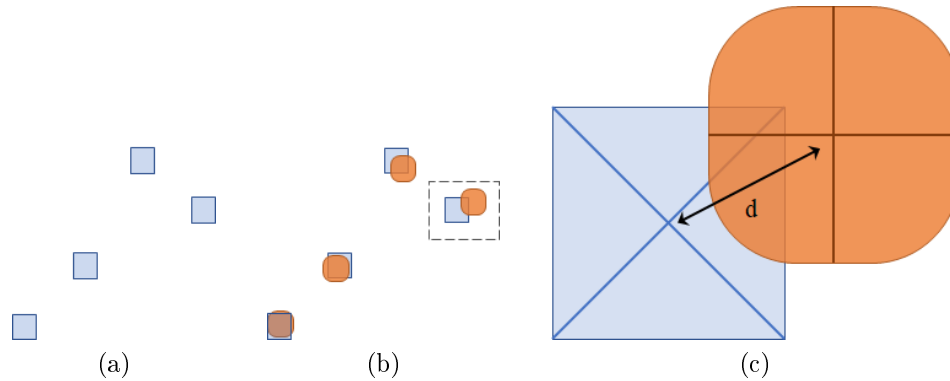


FIGURE 3.7: Etablissement des règles de dessins. (a) Design. (b) Simulation de l'impression du design quand le procédé DSA est utilisé. (c) Zoom sur la zone hachurée de (b). Si la distance  $d$  est supérieur au seuil  $d_{max}$ , la configuration est interdite à l'aide d'une règle dessin.

### 3.5 Conclusion

Nous avons vu au cours de ce chapitre que la variabilité des procédés avait un impact considérable sur l'impression des motifs et donc sur la fiabilité des composants. La connaissance de ces variabilités est primordiale pour la définition des règles de dessin, et dans le cas qui nous intéresse, pour obtenir la valeur de déplacement maximale admissible  $d_{max}$ . Jusqu'à présent les informations de variabilités sont obtenues en mesurant des structures unidimensionnelles à l'aide d'images SEM et en corrélant les résultats obtenues avec des simulations lithographiques pour les structures 2D.

Le problème des structures unidimensionnelles est qu'elles ne permettent pas de voir des variations liées à des motifs 2D. Dans l'article [57], nous pouvons voir des effets sur des structures types bouts de ligne ayant bien plus de variabilité que des variations observées avec des lignes droites imprimées avec le même procédé. En outre, l'utilisation des simulations pour évaluer la variabilité est problématique car elle suppose d'avoir les bons modèles (optiques et gravures) ainsi que de les avoir bien calibrés. Ces raisons nous ont poussé à trouver des solutions techniques pour

---

l'obtention des variabilités directement depuis des images SEM, quel que soit le motif observé. Le chapitre suivant détaille le travail effectué.





# Chapitre 4

## Analyse expérimentale de la variabilité

Il est primordial, dans le cadre de l'étude, d'obtenir des informations géométriques provenant d'expériences pour définir la variabilité des procédés utilisés. En particulier, nous avons vu au cours du chapitre précédent que la connaissance des paramètres géométriques ainsi que de leur variabilité permettait de vérifier si le critère de fiabilité qui nous intéresse était satisfait.

Habituellement, ces informations de variabilité sont issues de mesures SEM sur des motifs unidimensionnels puis extrapolées à des motifs 2D à l'aide de simulations. Celles-ci sont donc sujettes à la précision des simulations utilisées. Or elles peuvent se révéler imprécises ou même fausses si les paramètres utilisés ne sont pas les bons. De plus, les simulations ne prennent pas en compte la variabilité de la gravure. Comme alternative, il est possible de récolter des informations statistiques sur des images, mais les structures utilisées sont unidirectionnelles et ne reflètent pas correctement les variabilités des procédés [57, 58].

Notre objectif est ici d'obtenir des informations statistiques sur n'importe quel type de structures, de manière la plus automatisée possible et, si possible, sans intervention humaine.

En microélectronique plusieurs outils de métrologie sont disponibles et permettent de mesurer des grandeurs associées aux procédés utilisés. Parmi les techniques les plus utilisées, le microscope électronique à balayage (ou SEM pour Scanning Electron Microscopy) permet d'obtenir un visuel des structures imprimées après lithographie et/ou après gravure. Son avantage principal est sa rapidité de mesure

en comparaison d'un TEM (Transmission Electron Microscopy).

Dans notre étude, une séquence de lithographie se compose de plusieurs étapes : l'exposition d'une résine, le retrait d'une partie de la résine après développement et enfin le dépôt de la matière d'intérêt qui peut être du métal pour un niveau contact ou encore de l'oxyde pour l'isolation de transistors.

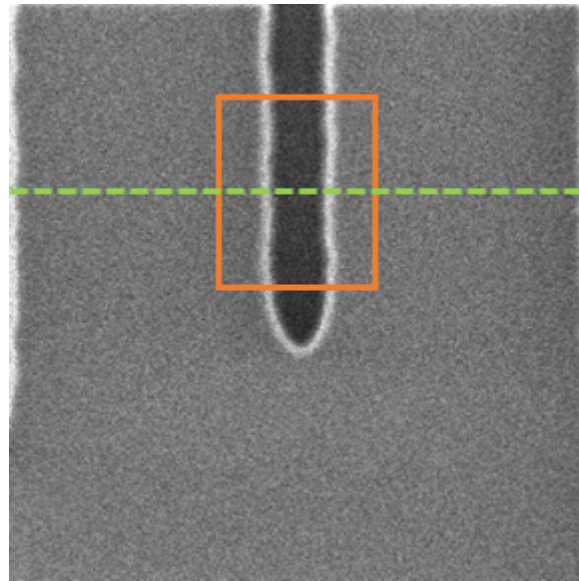
Pour mesurer la qualité du motif imprimé, des images sont prises à l'aide d'un SEM après le retrait final de la résine (après gravure). Pour le calcul des règles de dessin, nous nous intéressons aux images prises après gravure puisqu'il s'agit des motifs souhaités par le design.

Pour rappel, le SEM est un outil permettant d'obtenir des images d'un échantillon en le balayant avec un flux d'électrons. En détectant et en analysant le rayonnement d'électrons émis par l'échantillon en réponse au rayonnement incident, il est possible de reconstruire une image de la topographie de l'objet étudié. Par exemple, l'image [4.1a](#) est une image SEM prise après la gravure de la résine. Le niveau de gris le plus sombre, de valeur moyenne 50, représente le pied de la résine : il y a peu d'électrons de cette zone qui parviennent au détecteur. Le deuxième niveau de gris, de valeur moyenne 100, représente la partie haute de la résine. Enfin, les zones les plus lumineuses représentent les zones de transition entre zones d'altitude constante. A noter que la palette de gris est codée sur 8 bits, nous avons donc accès à une plage de valeur entre 0 et 255.

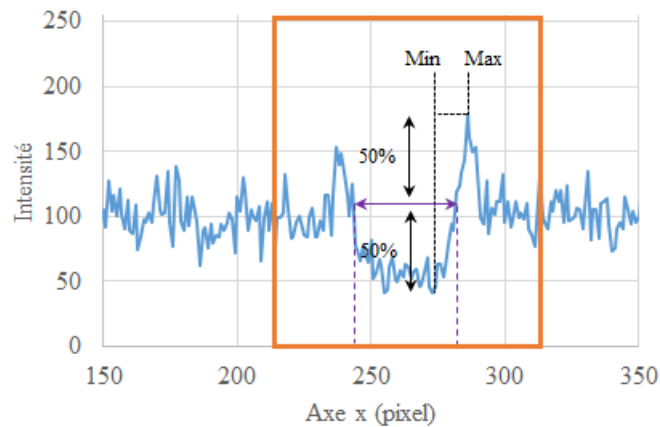
Dans ce chapitre, nous aborderons le traitement des images obtenues à l'aide d'un SEM ainsi que l'analyse qui en est faite. Etant donnée une image obtenue à l'aide d'un SEM, il s'agit d'extraire avec le plus de précision et de rapidité possible les caractéristiques géométriques des formes observées. Pour cela, les outils disponibles procèdent de la manière suivante :

1. Amélioration de la qualité de l'image brute.
2. Extraction des contours et mesure de dimension 1D.
3. Eventuellement alignement de contours similaires pour comparaison.

Pour mesurer la largeur des motifs, les logiciels existants vont, dans un rectangle défini par un utilisateur, faire un balayage horizontal et détecter les flancs de la résine à l'aide d'une intensité définie par l'utilisateur. Sur la figure [4.1](#), le balayage s'effectue dans le rectangle orange et selon la ligne verte. L'intensité correspondante à la ligne verte est représentée à la figure [4.1b](#). Le logiciel va d'abord détecter



(a)



(b)

FIGURE 4.1: (a) Image SEM. L'intensité représente la réponse électronique de l'échantillon illuminé. Plus l'intensité est importante et plus le capteur a reçu d'électrons. (b) Variation de l'intensité de l'image le long de la droite verte illustrée sur l'image (a).

les valeurs d'intensité minimale et maximale. Il va ensuite, pour trouver le point correspondant au flanc de la résine, balayer dans le sens valeur minimale vers valeur maximale jusqu'à une valeur seuil définie par l'utilisateur. Dans notre cas, cette valeur seuil est fixée à 50 % entre les intensités haute et basse. Il en résulte alors la détection des flancs de la résine selon la ligne verte de balayage et il est possible de mesurer la largeur de la ligne.

Cette méthode présente plusieurs faiblesses. La première porte sur l'impossibilité de mesurer d'autres types de structures que des lignes droites et des cercles. Dans

le cas illustré à la figure 4.1, il n'est possible de mesurer que la largeur de la ligne. Une information qu'il serait pourtant intéressant d'obtenir, le rayon de courbure en bout de ligne, n'est pas accessible directement. De plus, pour faire une mesure, l'utilisateur est obligé de définir une boîte pour définir l'emplacement de la mesure.

En outre, les points extraits à l'aide de cette méthode ne permettent pas d'obtenir une extraction des contours des motifs parfaite : il est nécessaire à l'issue de l'extraction de contours d'effectuer un traitement des contours obtenus. Parmi les techniques principalement utilisées, on peut citer le lissage des contours en se basant sur les descripteurs de Fourier [59] et le moyennage des contours [58]. Néanmoins, pour perdre le moins d'informations sur l'image originelle et pour limiter le temps de calcul, il est préférable d'utiliser le moins possible ces traitements. En conséquence, nous avons observé en début de thèse qu'il était difficile d'obtenir des informations de variabilité depuis les images SEM de manière efficace.

Pour palier à ces défauts, nous avons mis au point des techniques innovantes pour analyser les images SEM de manière la plus automatisée possible. Dans ce chapitre, nous allons présenter ces techniques à travers 4 sections :

Dans la première section de ce chapitre nous allons nous intéresser à la méthode d'extraction de contours et proposer 2 nouvelles solutions permettant d'obtenir une extraction fine des contours sans nécessité de post-traitement. La première solution est un nouveau filtre anti-bruit et l'autre concerne l'aplanissement de l'image de départ.

La seconde section concerne l'identification des motifs d'intérêts : il peut s'agir soit de la partie haute ou basse de l'image. En identifiant le niveau topographique, il est alors possible d'analyser seulement les motifs d'intérêts. Pour cela nous avons mis au point un algorithme de détection qui se révèle être efficace.

Dans la troisième section, nous allons nous intéresser aux différentes méthodes de mesure des caractéristiques géométriques et leur utilisation pour obtenir des données statistiques sur les motifs imprimés. Parmi les techniques on peut noter la mesure de dimensions critiques (ou CD pour Critical Dimension) et la régression de formes. Nous proposons aussi l'utilisation du squelette topographique d'une forme comme nouvel outil de mesure et nous verrons qu'il permet de s'affranchir d'un nombre important de contraintes pour la mesure de structures complexes.

Enfin, la dernière section montre l'application des méthodes présentées.

## 4.1 Extraction des contours

L'extraction des contours d'une image SEM se déroule en 2 étapes, une première étape de prétraitement où la qualité de l'image brute est améliorée et une étape où l'extraction à proprement parler est effectuée.

### 4.1.1 Réduction du bruit de l'image

Les images acquises étant bruitées, comme le montre l'image 4.1, il est nécessaire d'atténuer le bruit. Il existe de très nombreux filtres permettant de diminuer le bruit et nous allons voir dans cette sous-section les avantages et les inconvénients des principaux filtres existants et proposer un nouveau filtre qui s'est montré être le plus performant en termes de qualité d'image traitée et de rapidité de calculs.

Les filtres étudiés sont :

- Les filtres linéaires, qui consistent à convoluer l'image avec un masque. Cela revient à appliquer à l'image un filtre passe bas. Le principal avantage de cette méthode est sa rapidité d'exécution, mais comme nous allons le voir, l'image résultante voit son contraste diminuer et ses contours sont moins définis que sur l'image initiale.
- Les filtres anisotropiques, qui se basent sur le processus de diffusion en passant itérativement à travers un filtre linéaire.
- Les filtres non-linéaires, parmi lesquels on peut noter le filtre de Nagao, le filtre médian et le filtre bilatéral.
- Les filtres non-locaux (ou NL means pour Non-Local means). Parmi les filtres existants, nous allons voir que c'est le filtre le plus efficace pour retirer le bruit et pour conserver la finesse des contours observés.

Une revue de ces différents filtres est disponible à la référence [60]. Sur la figure 4.3 sont représentés les effets de ces différents filtres sur une image SEM ainsi que la meilleure extraction de contours obtenue. Nous observons que pour les cas linéaires, médian, Nagao et bilatéral (non représenté sur la figure mais dont le résultat est similaire au filtre médian), les contours obtenus sont ouverts et il existe des artefacts (contours de petites longueurs) qui nécessitent d'être filtrés. En comparaison, le filtre NL-means et le filtre que nous avons créé, produisent tous les deux les contours désirés sans artefacts.

Au cours de cette thèse, j'ai développé un nouveau filtre. Il se base sur le fonctionnement du filtre de Nagao et vient corriger l'un de ses principaux défauts, à savoir l'apparition d'un effet marche d'escalier que l'on distingue sur la figure 4.3c. Cela se traduit par une discontinuité de la dérivée de l'intensité en certains endroits. De plus, ce filtre dont les performances sont similaires au NL-mean se montre bien plus rapide (voir tableau 4.1).

Dans le paragraphe suivant nous allons présenter le fonctionnement du filtre de Nagao et proposer une amélioration de ce filtre. Nous effectuerons ensuite une comparaison en termes de temps de calculs entre les différents filtres utilisés.

**Filtre de Nagao** Le filtre de Nagao [61] est réputé pour lisser l'image de départ tout en conservant les pentes de l'image. Il consiste à remplacer chaque pixel par la valeur moyenne d'un voisinage choisi autour du pixel, le voisinage choisi étant celui dont la variabilité est la plus faible.

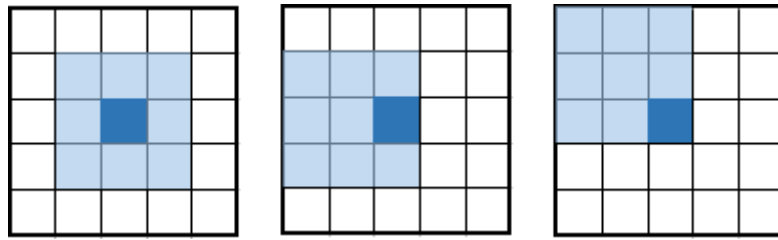


FIGURE 4.2: Exemples de voisinages pour le filtre de Nagao.

Sur la figure 4.2, on peut voir 3 des 9 voisinages utilisés par le filtre. Les autres voisinages sont obtenus en effectuant la rotation à 90 degrés des voisinages représentés au milieu et à droite. On note  $W_{x,y}$  l'ensemble des voisinages autour du pixel situé en position  $(x, y)$  et pour un voisinage  $w \in W_{x,y}$ , on note  $m_w$  et  $\sigma_w$  la valeur moyenne et la variabilité calculée pour le voisinage  $w$ . Autrement dit :

$$m_w = \frac{1}{9} \sum_{(u,v) \in w} I(u, v) \text{ et } \sigma_w = \frac{1}{9} \sum_{(u,v) \in w} (I(u, v) - m_w)^2 \quad (4.1)$$

Où  $I(u, v)$  représente l'intensité d'un pixel situé au point  $(u, v)$ . Ainsi, l'intensité finale  $I_f$  de l'image au point  $(x, y)$  après application du filtre sera alors :

$$I_f(x, y) = m_{w_{min}} \text{ avec } w_{min} = \min_{w \in W(x,y)} \sigma_w \quad (4.2)$$

Le résultat sur une image brute est visible à la figure 4.3. Le filtre semble être efficace, le bruit étant quasiment supprimé (peu de variation d'intensité sur des petites zones). En revanche, il induit la formation de marches dans la figure qui ont un impact négatif sur la détection de contours.

La principale cause de l'apparition de cet effet est attribuée à la perte d'information induite par le choix d'un voisinage particulier comme valeur finale.

Les informations d'intensité stockées dans les autres voisinages sont ainsi perdues alors qu'ils transportent aussi des informations importantes. Dans le paragraphe suivant, nous allons voir comment généraliser le filtre de Nagao pour obtenir un meilleur filtrage en utilisant au mieux toutes les informations.

**Filtre de Nagao pondéré** Pour prendre avantage de toutes les moyennes et de toutes les variabilités calculées au voisinage d'un point  $(x, y)$ , nous avons eu l'idée de pondérer chacune des moyennes par l'inverse de la variabilité associée. Ainsi, les régions de plus grande homogénéité auront un poids plus important tandis que les régions de forte variabilité (c'est à dire bruitées) verront leur influence diminuer. La valeur d'intensité finale au point  $(x, y)$  après application du filtre est égale à :

$$I_f(x, y) = \frac{1}{\sum_w \frac{1}{\sigma_w}} \sum_w \frac{m_w}{\sigma_w} \quad (4.3)$$

La fraction devant la somme pondérée étant un facteur de normalisation.

**Résultat** Sur la figure 4.3, on observe que le meilleur filtre anti-bruit est le filtre NL-mean suivi par le filtre que nous avons conçu. Dans les deux cas les contours extraits sont quasiment identiques (taux de recouvrement entre les 2 contours de 100%), les autres filtres n'étant pas aussi efficaces : en utilisant le nouveau filtre ou le NL-mean, il n'est pas nécessaire, à l'issue de la détection des contours, d'effectuer un traitement supplémentaire pour fermer ou supprimer des contours.

Nous avons voulu aller un peu plus loin dans l'analyse du bruit et essayer de départager les différents filtres de manière objective. Dans la majorité des articles présentant des filtres, les auteurs ajoutent un bruit "aléatoire" à l'image et montrent ensuite le résultat de leur filtre sur l'image ainsi obtenue. Une autre méthode proposée dans [62] consiste à prendre l'image originale et à lui soustraire l'image filtrée. Ensuite, le meilleur filtre sera celui dont le résultat se rapprochera

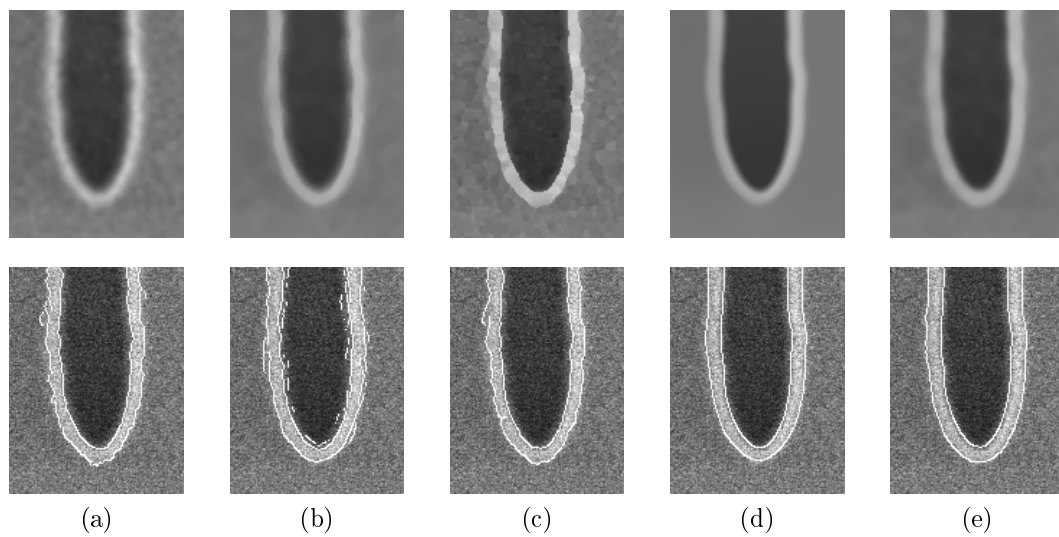


FIGURE 4.3: Atténuation du bruit et meilleures extractions de contours possible obtenues. (a) Linéaire. (b) Médian. (c) Nagao. (d) NL-means. (e) Nagao pondéré.

le plus d'un bruit. Il ne devrait pas apparaître dans le résultat de tracés caractéristiques. Les auteurs montrent notamment que leur filtre, le filtre NL-means, est celui dont le résultat ressemble le plus à un bruit, sans présence de caractéristiques de l'image originale. Dans le cas du DSA, les motifs générés s'organisent selon une période naturelle propre au procédé et qui est visible à la figure 4.4a. Sa transformée de Fourier est caractéristique et est particulièrement adaptée à l'analyse du bruit de l'image.

Le motif possède une transformée de Fourier caractéristique dont l'amplitude normalisée est représentée en bas de la figure. Les anneaux concentrique de la transformée de Fourier représentent la périodicité des motifs de l'image. Les droites horizontales et verticales représentent la pente des zones de transitions entre parties claires et sombres. Nous observons que l'utilisation du filtre de Nagao permet de gagner 1 anneau supplémentaire dans la transformée de Fourier tandis que le nouveau filtre permet de gagner 2 anneaux supplémentaires par rapport à l'image non-traitée. Ainsi, le nouveau filtre permet d'obtenir une meilleure réduction du bruit ce qui produit une transformée de Fourier plus contrastée.

Du point de vue de la rapidité de calcul, la table 4.1 référence pour un lot de 100 images de taille 512 x 512 pixels, le temps nécessaire pour appliquer les différents filtres. Nous observons que le filtre NL-mean prend 15 minutes tandis que le nouveau filtre ne prend que 54 secondes. Le gain en temps est considérable,



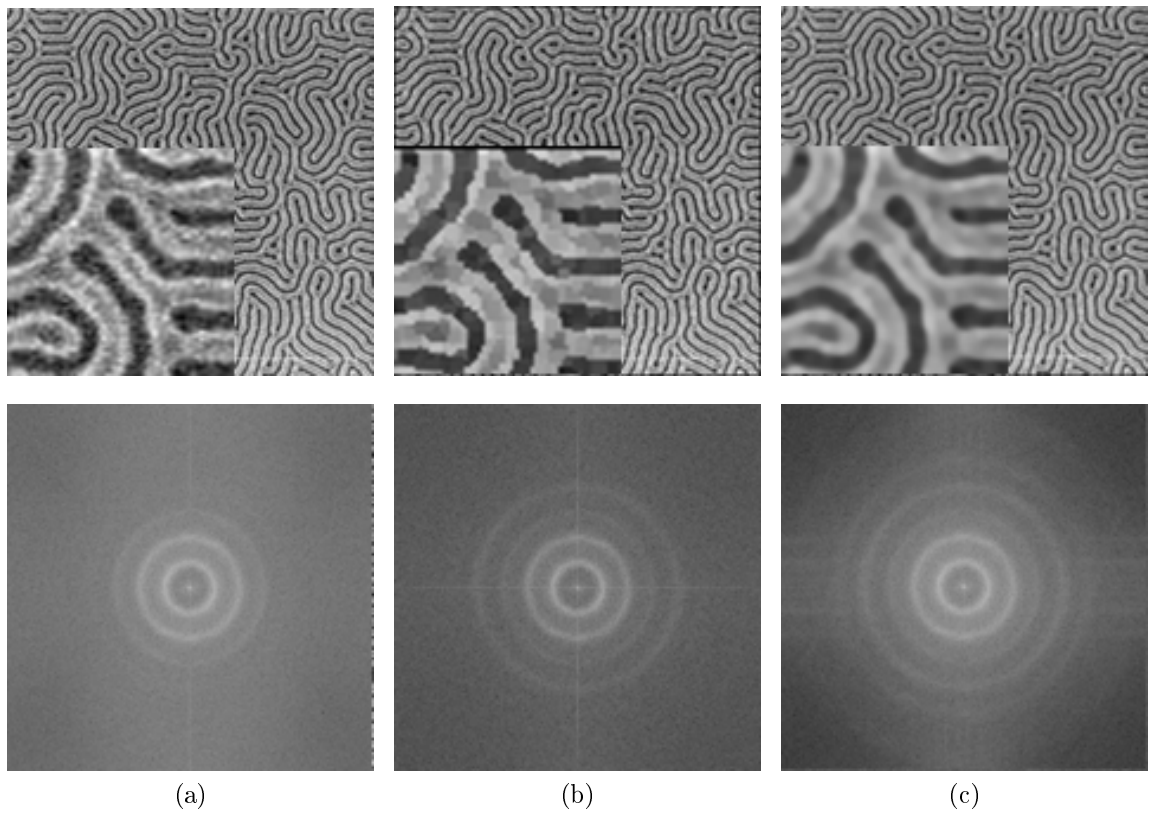


FIGURE 4.4: Image avec un agrandissement en haut et en bas la transformée de Fourier associée. (a) Image originale. (b) Image filtrée avec le filtre de Nagao. (c) Image filtrée avec le filtre de Nagao pondérée.

d'un facteur 17. Pour cette étude, les tests ont été implémentés en C++ et ont été lancés sur un ordinateur équipé d'un CPU cadencé à 2.53 GHz et de 4.00 GB de RAM. Le gain est énorme lorsqu'il s'agit de traiter un grand nombre d'images.

<b>Filtre</b>	<b>Temps d'exécution (s)</b>
Gaussien	0.5
Médian	4.8
Nagao	14.6
NL means	906.3
Nagao pondéré	54.0

TABLE 4.1: Temps de calcul pour un ensemble de 100 images de taille 512 x 512 pixels.

En outre, nous avons observé que l'utilisation des filtres autres que le filtre de Nagao pondéré et le NL-mean nécessite systématiquement de fermer les contours et de supprimer des contours isolés qui sont en fait des artefacts. Pour palier à ces défauts, plusieurs stratégies sont possibles.

Pour enlever les artefacts, il est possible d'appliquer un filtre pour supprimer les contours ayant une taille inférieure à une certaine limite. Néanmoins, cette méthode présente comme inconvénient majeur, la possible suppression de contours d'intérêt dans l'image.

Pour fermer les contours, il est possible de les connecter si leur distance est suffisamment proche. Le principal détracteur de cette méthode est la possibilité de connecter des contours qui n'appartiennent pas au même objet mais qui sont relativement proches. Le filtre NL-mean, lui, produit des images dont les contours sont correctement extraits, c'est à dire ne nécessitant pas de traitements supplémentaires.

Ces 2 techniques nécessitant l'utilisation d'un seuil qui n'est pas forcément le même selon les images, il est préférable de s'en passer et c'est là tout l'intérêt des filtres NL-means et Nagao pondéré puisque l'on s'affranchit de ces 2 traitements.

Pour conclure sur cette partie, le nouveau filtre que l'on appellera par la suite filtre de Nagao pondéré est le plus adapté pour le traitement des images SEM car il présente les mêmes résultats que le filtre NL-mean (en termes de qualité de contours résultant) tout en étant 17 fois plus rapide. Dans la suite, nous utiliserons ce filtre pour corriger les images bruitées.

### 4.1.2 Applanissement de l'image

En observant les images SEM, brutes ou même après réduction du bruit, il apparaît que le fond n'est pas uniforme. A priori, l'image SEM d'une surface parfaitement plane et homogène devrait avoir une intensité constante modulo le bruit lié à la mesure. Or, si l'échantillon présente une inclinaison par rapport à sa position idéale, l'intensité lumineuse de l'image présentera des variations non-expliquées par le bruit.

Lorsque l'échantillon a 2 niveaux topographiques distincts, ce phénomène est aussi présent : chaque niveau pris séparément ne possède pas une intensité constante modulo le bruit mais présente bien des variations. Il est à noter que l'intensité proche des zones de transition entre les deux niveaux peuvent être l'objet d'aberrations comme un assombrissement localisé comme décrit dans [63], mais ces variations sont locales et non étendues sur l'ensemble de l'image. Dans la suite, nous chercherons à corriger seulement les variations d'intensité à l'échelle de l'image et non localement.

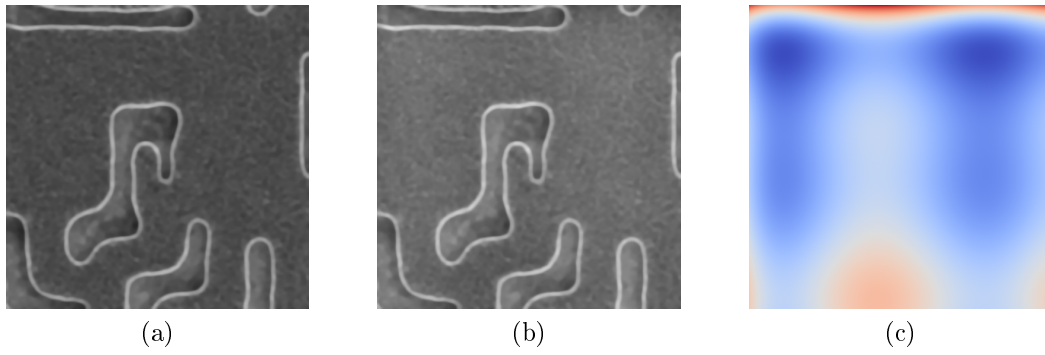


FIGURE 4.5: Applanissement d'image SEM à l'aide d'une régression polynomiale. (a) Image originale. (b) Image obtenue après soustraction du polynôme à l'image initiale. (c) Polynôme issue de la regression utilisée pour la correction. Les valeurs bleus correspondent à une correction de -42 et les valeurs rouges correspondent à une valeur de 2. L'échelle est en niveau de gris. Le gradient de couleur représente les variations entre ces deux valeurs.

Etant donné que le fond apparait comme une surface dont les variations sont relativement lentes par rapport à la taille de l'image, nous supposons que l'intensité du fond de l'image  $I_{bg}$  peut-être représentée par un polynôme :

$$I_{bg}(x, y) = \sum_k \sum_p a_{kp} x^k y^p \quad (4.4)$$

Les inconnues du système sont les coefficients  $a_{kp}$  et pour les déterminer, nous effectuons une régression linéaire. Le système linéaire s'écrit  $Ax = b$  où

$$\begin{aligned} A &= [x^{d_x} y^{d_y} \ x^{d_x-1} y^{d_y} \ x^{d_x} y^{d_y-1} \ \dots \ xy \ x \ y \ 1]_{(1 \leq x, y \leq n)} \\ {}^t x &= [a_{d_x, d_y} \ a_{d_x-1, d_y} \ a_{d_x, d_y-1} \ \dots \ a_{1,1} \ a_{1,0} \ a_{0,1} \ a_{0,0}] \\ {}^t b &= [I(x, y)]_{(1 \leq x, y \leq n)} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Ce système se résout de manière relativement simple mais se montre gourmand en ressources puisqu'il demande l'inversion de la matrice  ${}^t AA$  qui est de taille  $n^2 n^2 = n^4$ .

C'est pourquoi nous allons simplifier l'approximation polynomiale du fond de l'image. Nous faisons une étape supplémentaire en supposant que l'intensité du fond peut s'écrire comme étant égale à la somme de deux polynômes  $P$  et  $Q$  dont

l'un est fonction de l'axe  $x$ , par exemple  $P$ , et l'autre est fonction de l'axe  $y$ , dans notre cas  $Q$ . De plus, nous supposons aussi que les polynômes sont calculés à l'aide de la valeur moyenne de l'intensité, perpendiculairement à leur axe de variation. En se basant sur ces hypothèses, nous obtenons le système suivant :

$$\begin{aligned} P(x) &= \sum_{k=0}^{d_x} p_k x^k = \frac{1}{n} \sum_y I_{bg}(x, y) \\ Q(y) &= \sum_{k=0}^{d_y} q_k y^k = \frac{1}{n} \sum_x I_{bg}(x, y) \end{aligned} \quad (4.6)$$

L'obtention des coefficients  $p_k$  et  $q_k$  s'effectue en résolvant deux systèmes linéaires de taille  $n$  ce qui est beaucoup plus rapide qu'un seul système linéaire de taille  $n^2$ . Une fois les deux systèmes résolus, nous soustrayons la partie variable du polynôme  $P + Q$  à l'intensité initiale (visible sur la figure 4.5c) pour obtenir l'intensité corrigée. Le polynôme permettant de corriger l'image initiale illustré sur la figure 4.5a est visible sur la figure 4.5c. Au final l'amplitude de la correction est, dans ce cas, de 44 et le résultat est montré figure 4.5b ce qui n'est pas négligeable lors d'une extraction de contours se basant sur un seuil simple.

### 4.1.3 Techniques d'extraction des contours

Les contours d'une image correspondent aux points où il y a un changement d'intensité important ou une discontinuité. Notre objectif, lors de la détection des contours de nos images SEM, est d'obtenir la frontière entre la partie basse de l'échantillon et la zone de transition ainsi que la frontière entre la partie haute de l'échantillon et la zone de transition.

Pour y parvenir, la méthode la plus simple se base sur un simple seuillage de l'image : tous les pixels dont l'intensité est inférieure au seuil sont transformés en pixels noirs et ceux dont l'intensité est supérieure au seuil sont transformés en blanc. Il s'agit d'une segmentation de l'image en deux parties, l'une noire et l'autre blanche et les contours qui nous intéressent sont les frontières entre les deux parties. Un exemple de l'utilisation de cette technique est visible à la figure 4.6.

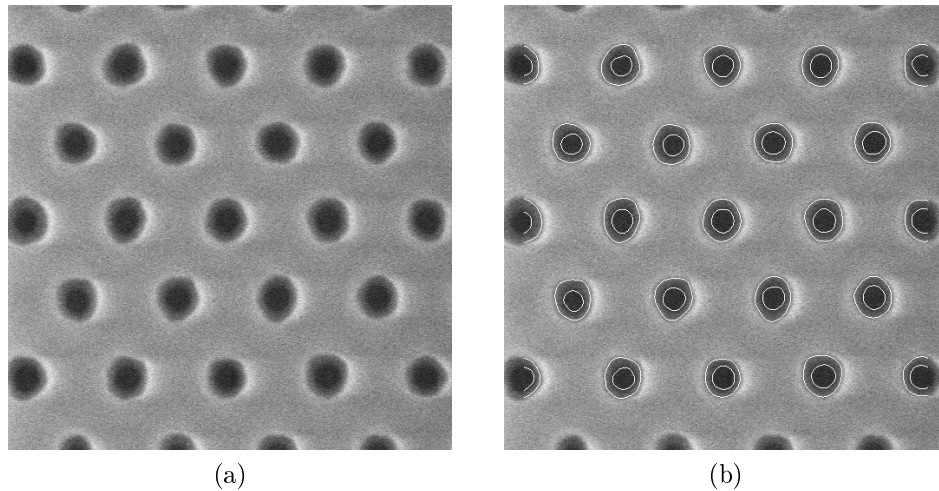


FIGURE 4.6: Exemple de détection de contours en utilisant la technique à seuil simple. (a) Image originale. (b) Image originale et contours détectés représentés en ligne blanche.

Nous avons observé que cette technique se révèle être très efficace pour les niveaux de type contact mais que pour d'autres niveaux, elle ne donne pas la segmentation de l'image souhaitée, à savoir capturer les frontières entre les trois types de zones observées : partie haute, partie basse et zone de transition entre les deux.

L'alternative que nous avons choisie est le filtre de Canny, décrit dans l'article original [64] car il a donné entière satisfaction.

Pour parvenir à une analyse automatique de l'image et ainsi éviter de perdre du temps, il est nécessaire d'identifier les différents objets de l'image sans recours à une analyse humaine. Nous allons dans la prochaine section nous intéresser à ce problème et proposer une solution pour le cas d'un échantillon exhibant deux niveaux.

## 4.2 Détection de la topographie

Avec l'expérience, nous sommes capables d'identifier sur une image SEM à quel niveau ou topographie appartient un segment d'une image en se basant sur l'intensité de l'image et sur les motifs présents. Par exemple, sur l'image 4.7a, la personne avertie reconnaîtra les zones d'altitude élevée et basse de l'échantillon observé.

Cette personne se sera basée pour faire sa déduction sur les points suivants :

- Les zones de pentes de l'échantillon sont généralement celle les moins larges et dont l'intensité est la plus élevée et la plus variable.
- Connaissance des motifs observés et de la manière dont ils sont agencés.
- Expériences précédentes.

Nous allons mettre en place dans cette section une analyse qui vise à automatiser l'identification de ces zones et qui se basera sur les deux premiers points précédents.

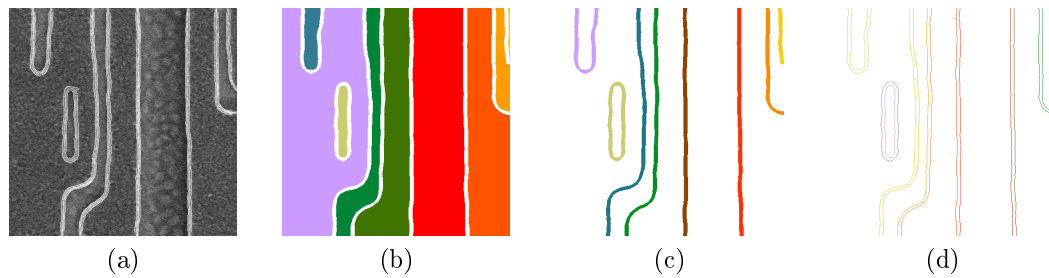


FIGURE 4.7: Identification des primitives de l'image. (a) Image originale recouverte par les contours extraits. (b) Zone d'intérêts. Il peut s'agir soit de la zone haute de l'échantillon ou de la zone basse : il n'y a pas de distinction faite à ce niveau. (c) Zones de pentes dans l'image. (d) Les Contours : frontières entre zone basse de l'échantillon et pentes ainsi que des frontières entre zones hautes et pentes.

#### 4.2.1 Définition et détection des primitives

Pour la suite, nous définissons des primitives qui représentent une segmentation de l'image. Il s'agit de motifs isolés qui peuvent être de deux natures différentes :

- **Les Zones d'intérêts (ou AOI)** qui sont les motifs des parties hautes et basses de l'échantillon (illustré figure 4.7b).
- **Les zones de pentes** qui sont simplement les zones de transitions entre une partie haute et une partie basse (illustré figure 4.7c).

L'extraction de ces primitives se base sur les contours, car ceux-ci offrent une segmentation de l'image en zones isolées. En utilisant un algorithme de remplissage, nous sommes en mesure de créer l'ensemble des primitives illustrées à la figure 4.7. Pour le moment, chacune des primitives que l'on notera  $p_i$  n'a aucune information sur leur connectivité avec d'autres primitives et n'a pas non plus d'informations quant à la topographie associée.

En identifiant les primitives adjacentes, l'image peut alors se représenter comme un graphe  $G$  dont chaque noeud est l'une des primitives de l'image et où les arrêtes sont les contours  $c_i$  de l'image.

Nous observons, qu'une partie haute est obligatoirement connectée à une partie basse à l'aide d'une pente et, qu'à priori, une partie haute (respectivement basse) ne peut être connectée à une autre partie haute (respectivement basse) via une pente. Cela nous permet d'affirmer que le graphe est un graphe biparti, c'est à dire, un graphe qui possède deux sous-ensembles telle que chaque arrête ait un sommet dans un ensemble et l'autre sommet appartenant à l'autre ensemble.

Ceci est un argument fort car il permet non seulement de vérifier que la décomposition de l'image s'est bien effectuée (le graphe associé doit être biparti) mais cela permet aussi de décomposer l'image en deux ensembles disjoints de primitives : les AOI et les pentes. Dans notre implémentation, nous avons cherché à vérifier que le graphe ne contenait pas de cycle impair et avons décomposé le graphe en deux ensembles  $U$  et  $V$ . A ce stade, nous savons que l'un des deux ensembles contient les pentes, et l'autre les zones d'intérêts, mais nous ne sommes pas encore en mesure de les identifier.

### 4.2.2 Identification de la topographie.

Ici plusieurs stratégies sont possibles et nous n'en avons retenu qu'une seule. Nous avons pu distinguer les deux ensembles en étudiant leurs histogrammes respectifs et en se basant sur plusieurs critères. Le premier est le nombre de pixels : dans les cas que nous avons rencontrés, le nombre de pixels des zones de pentes est bien inférieur à celui des zones d'altitude constante. Ensuite, les pentes sont les éléments qui ont le moins de dispersion de dimension (ce qui correspond à une dispersion du rayon du squelette très faible, voire section 4.3.2 pour une présentation du squelette). Le dernier critère est basé sur la répartition d'intensité qui est caractéristique de chacune des parties et des matériaux observés. Nous allons maintenant définir nos indicateurs.

Le premier indicateur est le ratio  $r_n$  de pixels entre les deux ensembles  $r_n = n(U)/n(V)$  où  $n(U)$  représente le nombre de pixels de l'ensemble  $U$ .

Le second indicateur est le ratio  $r_{\sigma_R}$  de la variabilité moyenne du rayon des squelettes entre les deux ensembles  $r_{\sigma_R} = \sigma_R(U)/\sigma_R(V)$ .

Les deux derniers indicateurs portent sur la comparaison entre l'intensité des

deux ensembles. Nous calculons le ratio  $r_{\sigma_I}$  entre les variabilités des deux zones  $r_{\sigma_I} = \sigma_I(U)/\sigma_I(V)$  et le ratio de l'intensité moyenne :  $r_{m_I} = m_I(U)/m_I(V)$ .

**Détection des zones de pentes et des zones d'altitude constante.** A l'aide des indicateurs précédents, nous sommes en mesure d'identifier les zones de pentes, des zones d'altitude constante.

Le premier critère porte sur le ratio  $r_n$ , si celui-ci est inférieur à 1, il y a alors de fortes chances pour que  $U$  contienne les zones de pentes et s'il est supérieur à 1, alors  $V$  serait l'ensemble contenant les zones de pentes.

En outre, la dispersion des rayons des squelettes associés au zone de pentes devrait être plus faible que celle associée aux AOI. Donc si  $r_{\sigma_R}$  est inférieur à 1, il y a là aussi une forte probabilité que  $U$  contienne les zones de pentes et inversement si  $r_{\sigma_R}$  est supérieur à 1.

Pour ce qui concerne l'intensité, nous avons observé une plus forte variabilité de celle-ci pour les zones de pentes ainsi qu'une intensité moyenne plus élevée. Donc si  $U$  contient les zones de pentes, alors on devrait avoir  $r_{\sigma_I}$  et  $r_{m_I}$  supérieurs à 1.

Ces informations sont récapitulées dans le tableau suivant :

	< 1		> 1	
	$U$	$V$	$U$	$V$
$\mathbf{r_n}$	Pentes	AOI	AOI	Pentes
$\mathbf{r_{\sigma_R}}$	Pentes	AOI	AOI	Pentes
$\mathbf{r_{m_I}}$	AOI	Pentes	Pentes	AOI
$\mathbf{r_{\sigma_I}}$	AOI	Pentes	Pentes	AOI

TABLE 4.2: Indicateurs du type de topographie.

Nous avons donc 4 indicateurs et selon leurs valeurs, les ensembles  $U$  et  $V$  peuvent être discernés en zones de pentes et AOI. La méthode qui semble être la plus robuste consiste à utiliser des techniques de partitionnement de donnée [65]. Néanmoins nous avons préféré une méthode beaucoup plus simple à savoir la création d'un indicateur global  $r$  regroupant les 4 ratios :

$$r = \frac{r_n + r_{\sigma_R} + (2 - r_{m_I}) + (2 - r_{\sigma_I})}{4} \quad (4.7)$$



Nous associerons les zones de pentes à  $U$  et les AOI à  $V$  dans le cas où  $r$  est inférieur à 1 et inversement si  $r$  est supérieur à 1.

**Différentiation des zones d'altitude constante.** Supposons que  $V$  soit l'ensemble des zones d'altitudes constantes. Nous créons alors un nouveau graphe  $G'$  dont les noeuds sont les primitives de  $V$  qui sont connectées entre elles par des arêtes définies par les éléments de  $U$ .

Ce graphe est lui-même biparti et nous pouvons donc créer deux sous-ensembles  $T$  et  $X$  dont un va contenir la partie haute de l'échantillon et l'autre la partie basse. La figure 4.8 illustre le nouveau graphe obtenu ainsi que les deux ensembles  $T$  et  $X$  à l'aide des couleurs rouge et bleu. Pour les différencier, nous utilisons simplement les informations d'intensité moyenne et leur variabilité pour faire la distinction.

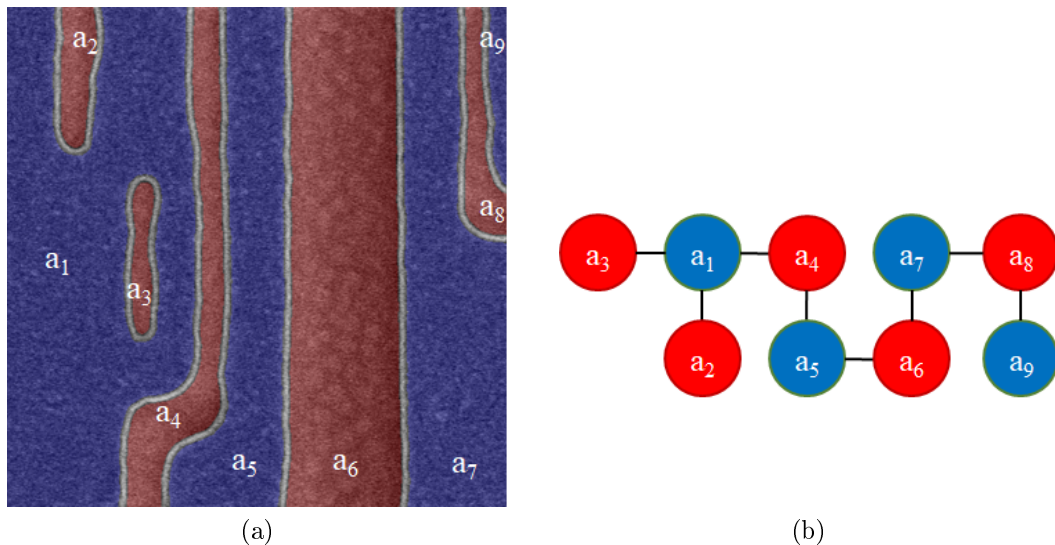


FIGURE 4.8: (a) Les primitives représentant les zones d'altitudes constantes sont représentées en bleu et en rouge. (b) Représentation du graphe  $G'$ . Chaque élément du graphe est relié à un autre via une arête qui était précédemment définie comme étant une zone de pente dans le graphe  $G$ .

Avec le mécanisme ainsi mis en place, chaque motif présent sur une image SEM est ainsi isolé et on connaît la topographie correspondante sur l'échantillon ainsi que les liens avec les autres motifs sur l'image.

Une fois l'image traitée et la topographie de l'image extraite, il est maintenant possible d'en étudier les géométries.

## 4.3 Mise en place de la métrologie

Dans cette section nous allons nous intéresser aux méthodes de mesure permettant d'extraire, à partir des contours SEM, les caractéristiques géométriques des motifs imprimés sur plaque. Dans un premier temps, nous allons voir quels sont les principaux outils de mesure, leur fonctionnement ainsi que leur efficacité. Dans un deuxième temps, nous allons présenter l'utilisation du squelette topologique comme outil de mesure SEM. Cette technique présente des avantages conséquents par rapport aux techniques usuelles car elle est utilisable quel que soit le motif étudié.

### 4.3.1 Régression d'ellipses

Lors de l'étude de forme elliptique, la mesure CD n'est plus adaptée et il est nécessaire de faire correspondre une ellipse au motif. Plusieurs techniques de régression sont disponibles selon deux types de fonctionnement :

- Les méthodes géométriques cherchent à minimiser la distance géométrique entre une ellipse et l'ensemble de points étudiés.
- Les méthodes algébriques cherchent à minimiser la distance algébrique.

Les méthodes géométriques sont des méthodes non-linéaires et elles sont souvent plus lentes mais plus précises que les méthodes algébriques, qui elles, sont linéaires. De plus, les méthodes géométriques peuvent diverger, ce qui n'est pas souhaitable lors de l'étude d'un large panel de données. Une étude approfondie dans le cas du cercle a été menée dans l'article [66].

La lenteur des régressions géométriques est expliquée par le fait que ces méthodes sont itératives, alors que dans le cas algébrique, il n'y a pas d'itération à effectuer. En outre, l'implémentation des méthodes algébriques est plus aisée. Pour ces raisons, nous avons choisi d'implémenter dans notre étude des méthodes algébriques. Parmi celles étudiées, nous avons retenu celle présentée dans l'article [67] pour ses performances et sa stabilité.

Une ellipse est caractérisée par son équation qui peut s'écrire sous la forme polynomiale suivante :

$$F(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (4.8)$$

Avec la condition  $b^2 - 4ac < 0$  pour s'assurer que la conique associée soit bien une ellipse. Le vecteur  $\mathbf{a}$  de l'ellipse s'écrit :  $\mathbf{a}^T = [a, b, c, d, e, f]$ . Le principe de la régression consiste à minimiser le problème suivant :

$$\min_{\mathbf{a}} \|D\mathbf{a}\| \text{ avec la contrainte } \mathbf{a}^T C \mathbf{a} = 1 \quad (4.9)$$

Une fois minimisé, nous obtenons les paramètres géométriques de l'ellipse.

Cette technique s'applique bien pour des motifs elliptiques mais ne peut pas se généraliser à d'autres types de motifs. Généralement, pour mesurer des motifs unidimensionnels (comme des lignes droites), la technique employée est la mesure de dimension critique (ou mesure CD pour Critical Dimension) qui consiste à mesurer la largeur des motifs en mesurant la distance entre certains niveaux d'intensité. Durant nos travaux, nous ne l'avons pas utilisé car celle-ci se révèle trop limitante pour l'étude de motifs complexes.

### 4.3.2 Squelette topologique, un puissant outil de mesure

Nous verrons au chapitre 4 que le squelette est un puissant outil de prédiction pour le placement des domaines au sein d'un guide confiné. Durant cette thèse, nous avons été confronté à des motifs à géométrie complexe qu'il était nécessaire de mesurer et le squelette topologique s'est naturellement imposé comme outil de mesure universelle.

Dans cette sous-section nous allons définir ce qu'est un squelette topologique et présenter les méthodes de calcul envisagées et présenter comment il peut être utilisé pour l'identification et la mesure des motifs.

#### 4.3.2.1 Définition du squelette topologique

Le squelette permet de simplifier considérablement une forme compliquée en un nombre réduit de points. C'est un outil employé massivement pour la reconnaissance de caractères [68], l'animation [69], la simulation de la croissance d'arbres [70] ainsi que dans de multiples autres domaines.

Il existe de nombreuses définitions du squelette et nous empruntons celle décrite dans [71] qui nous paraît être la plus précise. Pour définir le squelette, nous avons besoin de définir la notion de boule maximale :

**Définition :** Une boule  $B$  incluse dans un objet  $X$  est dite maximale s'il n'existe pas d'autres boules  $B'$  incluses dans l'objet et la contenant strictement :

$$B \subset B' \subset X \Rightarrow B = B' \quad (4.10)$$

Le squelette d'un objet  $X$  est alors défini comme étant l'ensemble  $Sk(X)$  des boules maximales de  $X$  et la squelettisation est la transformation qui associe à un objet  $X$  son squelette  $Sk(X)$ . Cette transformation peut être vue comme une compression de la forme initiale et dans l'idéal, il est possible de reconstruire l'objet  $X$  en dessinant les boules maximales de l'ensemble  $Sk(X)$ .

Or selon la transformation choisie, il n'est pas garanti que cette reconstruction soit parfaite comme nous le verrons au chapitre consacré à l'étude des images SEM. Par la suite, nous considérerons que la transformation est parfaitement bijective et nous noterons le squelette comme une liste de coordonnées de dimension 3 :  $\{(x_B, y_B, R_B), B \in Sk(X)\}$ .

#### 4.3.2.2 Méthode de calcul

Il existe de nombreuses méthodes de calcul du squelette et nous avons choisi dans cette étude d'implémenter deux de ces méthodes. Ce sont des méthodes dites discrètes car l'objet est mémorisé sous forme d'image matricielle et les opérations effectuées sont typiques de la géométrie discrète.

Les deux techniques envisagées sont la squelettisation par aminsciments successifs de l'objet et par calcul de la carte des distances de l'objet. On peut trouver dans [72] une évaluation de différents algorithmes existants. Dans les deux paragraphes suivants nous allons voir plus en détail le fonctionnement des deux techniques et comparer leur efficacité.

### 4.3.2.3 Opération morphologique

Nous supposons une image binaire (dont les pixels sont soit égaux à 1 soit égaux à 0) dont les pixels blancs (de valeur 1) représentent l'objet X. La technique consiste à éroder de manière successive l'objet initial en employant des opérateurs morphologiques et à chaque itération les pixels en bout de segments sont conservés. Voir la figure 4.9 pour un calcul pas à pas du squelette pour un rectangle.

L'avantage de cette méthode est qu'elle préserve les propriétés topologiques ainsi que la forme de l'objet initial. Ainsi la reconstruction à partir de l'objet à l'aide du squelette calculé est très bonne comme nous le verrons par rapport à l'autre méthode envisagée.

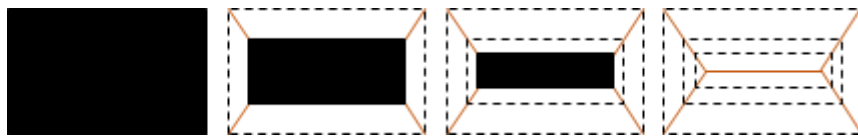


FIGURE 4.9: Amincissement successif de l'objet pour l'obtention du squelette représenté en orange.

Pour cette étude, nous avons employé une version améliorée de cet affinage décrit dans [73]. L'avantage principal étant la parallélisation du calcul qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul.

### 4.3.2.4 Carte des distances

Cette technique se base sur le calcul de la carte de distance de l'objet X. La carte de distance associe à chaque pixel de l'image la distance au point du contour de l'objet le plus proche. Si on note  $\partial X$  le contour de l'objet X, alors la valeur du pixel au point M est donnée par :

$$D_{min}(M) = \min_{Q \in \partial X} \|MQ\| \quad (4.11)$$

Par exemple, dans la figure 4.10, les contours de l'objet sont représentés par un niveau de gris égal à 255. A droite est représentée la carte de distance associée.

Les points du squelette sont alors les lignes de crête de la carte des distances. Pour obtenir ces points, nous avons calculé dans un premier temps le gradient

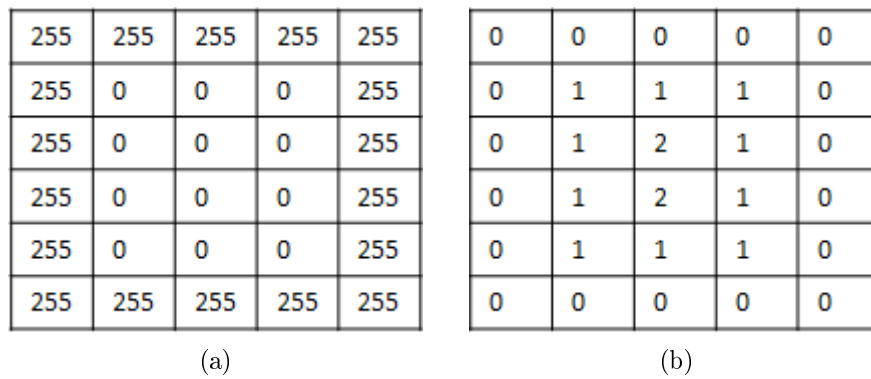


FIGURE 4.10: Calcul de la carte des distances. (a) Contours de l'objet représenté par le niveau d'intensité 255. (b) Carte des distances. Les valeurs indiquent la distance minimale aux contours illustrées figure (a).

de la carte de distance  $\nabla D_{min}$  et enfin appliqué un seuillage pour récupérer ces maxima. L'ensemble de ces opérations est décrit dans l'ordre à la figure 4.11.

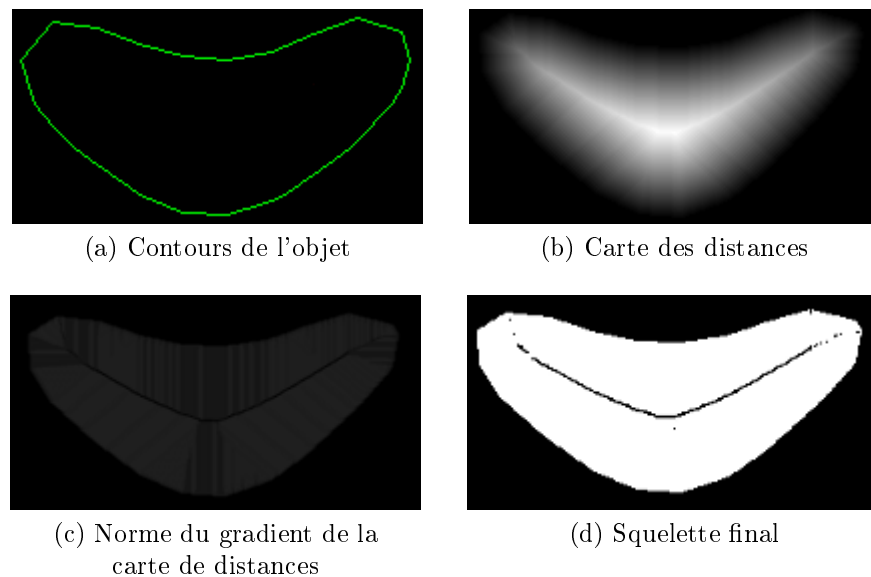


FIGURE 4.11: Calcul du squelette par analyse de la carte des distances.

**Choix du paramètre de seuillage** Le principal avantage de cette méthode est qu'elle est non-itérative et donc rapide. Elle peut aussi être précise, néanmoins, il faut choisir avec précision le paramètre de seuillage pour à la fois obtenir une bonne reconstitution de l'objet initial et pour n'avoir pas trop de points (si tous les points du squelette correspondent à l'ensemble des points de l'objet initial, on a perdu le principal intérêt du squelette, à savoir la compression).

Pour la reconstruction, il faut se rappeler que le squelette est un ensemble de points  $(x, y, R)$  qui est en fait une version compressée de l'objet étudié. En supposant le squelette parfait et en dessinant l'ensemble des disques de centre  $(x, y)$  de rayon  $R$ , nous devons obtenir l'image de l'objet initial  $X$ .

Pour mesurer la précision de la reconstruction de l'objet initial par son squelette, nous définissons alors un indice de similitude  $S(X)$  qui compte le nombre de pixels non-identiques divisé par le nombre de pixels de l'objet initial.

$$S(X) = 1 - \frac{\text{card}(X \oplus Sk(X))}{\text{card}(X)} \quad (4.12)$$

Plus cet indice se rapproche de 100 % et plus la reconstruction est parfaite.

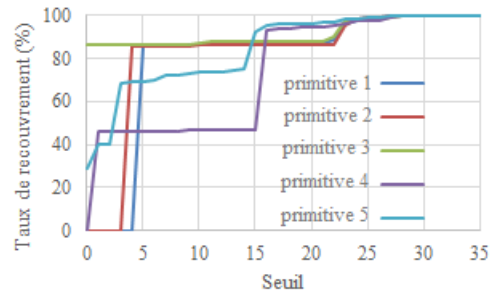
La figure 4.12a montre l'évolution de l'indice  $S$  en fonction du seuil appliqué. Pour une valeur de seuil choisi égale à 27, le taux de similitude est de 100,00 % indiquant une reconstruction parfaite. En regardant le graphique 4.12b, l'évolution du nombre de points du squelette est représentée en fonction du seuil, on observe un saut après un seuil de 32. Après cette valeur, le squelette n'est plus pertinent pour représenter l'objet car on perd cette notion d'axe moyen qu'est le squelette : la quasi-totalité des points de  $X$  est alors considérée comme faisant partie du squelette. De cette étude, nous avons choisi un seuil de 28, ce qui a permis de traiter l'ensemble des images rencontrées : il s'agit du seuil qui fournit le meilleur compromis entre bonne reconstruction (égal à 100 %) et compression.

Idéalement, le choix du seuil devrait dépendre de l'objet étudié pour avoir un optimal entre la compression de l'objet et la précision souhaitée.

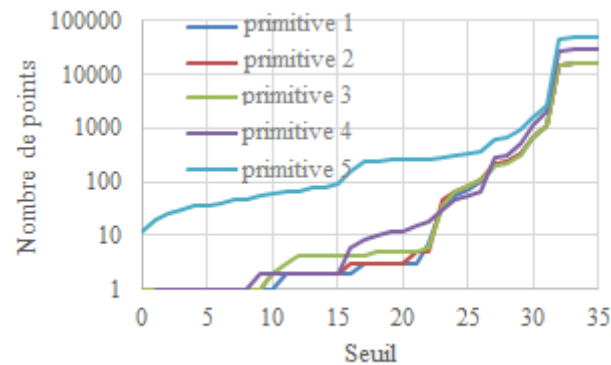
#### 4.3.2.5 Comparaison des deux méthodes

Pour pouvoir comparer les deux méthodes, nous avons choisi un ensemble d'images typiques des structures étudiées dans la suite de l'étude, à savoir des objets issus de l'extraction de contours d'images SEM, au total, 1000 objets ont été étudiés. Deux éléments sont comparés : le temps de calcul et la précision du squelette calculé.

La technique se basant sur les opérations morphologiques a comme avantage principal sa facilité d'utilisation : il n'y a pas de paramètres à modifier pour obtenir



(a)



(b)

FIGURE 4.12: Calcul du squelette par analyse de la carte des distances pour les 5 primitives illustrées en rouge figure 4.8a. Evolution en fonction du seuil (a) du taux de recouvrement (b) nombre de points du squelette.

les squelettes. De plus la précision résultante est assez bonne avec un taux de recouvrement de 97 % en moyenne avec une variabilité de 0.5 %.

En revanche cette technique se montre gourmande en temps de calcul puisque pour un objet constitué de 125 x 125 pixels, elle met environ 2.146 secondes pour être analysée. Typiquement lors d'une analyse, une centaine d'images sont étudiées et une image est généralement constituée d'une dizaine d'objets. Ainsi, pour calculer le squelette de chaque objet, le temps de calcul nécessaire serait d'environ 35 minutes ce qui est relativement long.

Pour la technique se basant sur la carte de distances, nous avons vu que la précision pouvait être parfaite à condition de calibrer correctement le paramètre de seuil. Le temps de calcul est lui bien inférieur à la technique précédente, l'analyse prend 0.016 secondes pour une image 512 x 512 et le temps de calcul est indépendant du nombre d'objet dans l'image.



La table 4.3 référence la liste des avantages et inconvénients des deux méthodes de squelettisation présentées.

Techniques	Avantages	Inconvénients
Morphologiques	Précision	Lenteur, Nécessité d'avoir des contours fermés
Carte de distances	Rapidité	Calibration nécessaire

TABLE 4.3: Avantages et inconvénients des méthodes de squelettisation.

Par la suite, la technique employée est celle se basant sur la carte des distances et nous allons voir comment analyser les informations contenues dans les squelettes.

## 4.4 Applications

Nous avons maintenant tous les outils pour analyser de manière automatique les motifs présents sur une image SEM. Nous allons présenter 2 cas différents : le cas qui nous intéresse, à savoir le DSA, et un cas plus classique pour montrer toute la force de la méthode proposée.

Quelle que soit la situation, l'analyse s'appuiera sur les 3 modules présentés précédemment : extraction des contours, détection de la topographie et enfin analyse géométrique.

### 4.4.1 Mesures pour le DSA

Dans le cadre du DSA, nous avons eu accès à des images SEM de contact shrink comme illustré à la figure 4.6 et de multiplication de contacts.

#### 4.4.1.1 Cas du contact shrink

A partir des contours extraits de l'image 4.6, nous avons fait une régression d'ellipse sur chacun des contours détectés et les résultats sont visibles à la figure 4.13a pour la partie haute de l'image et à la figure 4.13b pour le bas de l'image.

Nous avons appliqué les méthodes décrites ci-dessus pour l'obtention de la variabilité de l'erreur de placement du centre de contact final par rapport au centre du

guide  $\sigma_{d,GP}$ . Pour obtenir cette valeur, nous avons utilisé un lot de 46 images similaires à celles illustrées figure 4.13a. Dans un premier temps, le bruit est supprimé et la non-uniformité est corrigée. Puis, la topographie est identifiée, permettant d'isoler les guides et d'obtenir les propriétés géométriques (visible à la figure 4.13a). Ce qui nous a permis d'obtenir une valeur de variabilité  $\sigma_{d,GP} = 1.8$  nm. Cette valeur sera réutilisée dans le chapitre suivant pour la détermination du critère de déplacement.

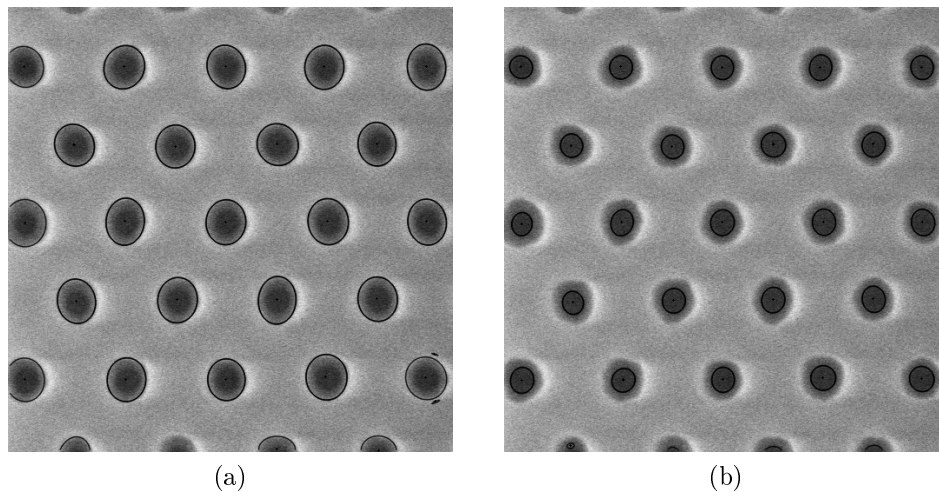


FIGURE 4.13: Résultat des régressions d'ellipse sur les motifs extraits de la figure 4.6. (a) Résultat sur le haut de la résine et (b) sur le bas.

#### 4.4.1.2 Cas de la multiplication de contacts

Dans le cas de la multiplication de contacts, nous avons observé que les domaines de PMMA, et donc les motifs finaux, se plaçaient selon l'axe du squelette. Pour vérifier expérimentalement ce résultat, nous avons utilisé les méthodes vues plus tôt. Dans ce cas, le bas de la résine représente les domaines gravés de PMMA, représentés en rouge sur la figure 4.14, et le haut de la résine va représenter le guide, représenté en vert sur la figure.

Une fois le guide obtenu, le squelette est extrait et sa position est comparée à celle des centres des domaines gravés de PMMA qui sont obtenus à l'aide d'une régression d'ellipse. La distance minimum entre le squelette et les domaines de PMMA a pu ainsi être mesurée et est égale à  $0.6 \pm 0.4$  nm. Cette valeur est inférieure à la précision du SEM (qui est de 1.0 nm).

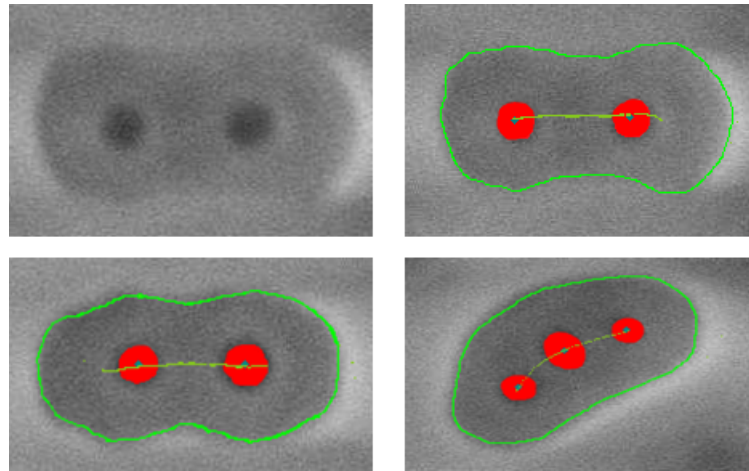


FIGURE 4.14: Utilisation du squelette topologique comme outil de prédiction du placement des centres de domaines de PMMA. Image originale en haut à gauche. Les 3 autres images présentent le résultat de l'extraction des contours en vert ainsi que les domaines de PMMA détectés en rouge et le squelette en vert pâle.

Le squelette se révèle donc être un outil précis pour déterminer la position des motifs de PMMA au sein d'un guide. Nous allons voir dans la prochaine sous-section qu'il peut être utilisé de manière plus générale pour la mesure de n'importe quel type de structures et qu'il remplace de manière avantageuse la mesure CD présentée dans l'introduction de ce chapitre.

#### 4.4.2 Exemple d'analyse pour niveau métallique 28 nm

Contrairement au noeud 10 nm, les lignes métalliques du noeud 28 nm ne sont pas unidirectionnelles. La figure 4.15 présente une image SEM prise après la gravure de la résine d'un tel niveau. Les lignes colorées représentent la reconstruction des motifs du bas de la résine par leur squelette respectif ainsi que l'évolution du rayon pour trois d'entre eux.

En analysant les courbes d'évolution du rayon en fonction de l'axe vertical, nous pouvons faire plusieurs observations.

La première est que la ligne verte a eu une croissance relativement lente du rayon le long de cet axe : environ 0.9 nm pour 100 nm.

La deuxième observation est que la ligne orange a trois domaines de fonctionnement distincts. Le premier, où le rayon de son squelette est constant de valeur  $19.6 \pm 0.7$  nm, le second où le rayon diminue à une nouvelle valeur de  $13.5 \pm 1.1$  nm en raison de la présence de la ligne bleue à proximité, et enfin une dernière partie

où le rayon augmente et se stabilise en dehors de l'image.

La troisième observation porte sur la ligne bleu foncé qui présente une diminution de son rayon en son centre et passe d'une valeur de 14.0 nm à ses bords à 7.9 nm en son centre.

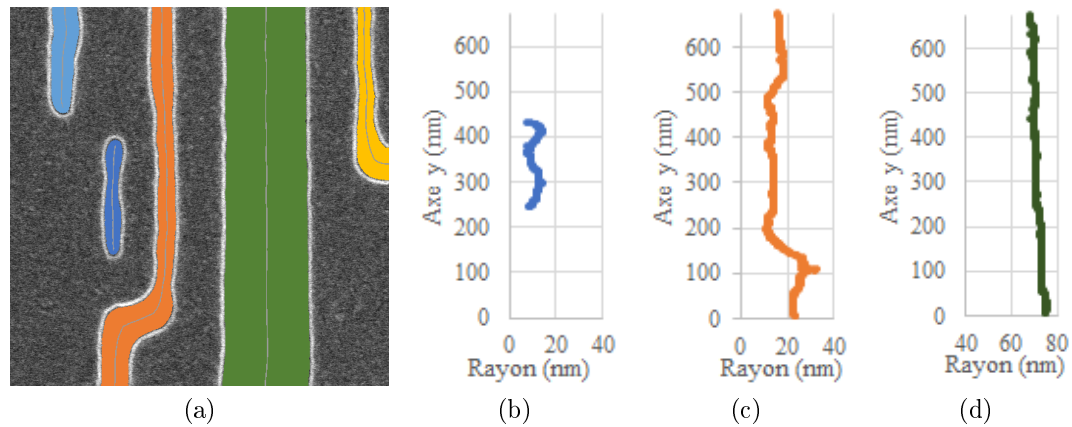


FIGURE 4.15: Exemple de squelettes extraits sur une image. (a) Reconstitution des zones de basse altitude à l'aide de leur squelette respectif. Les axes de squelettes sont représentés en gris et le volume associé en couleurs. (b), (c) et (d) Evolution du rayon du squelette le long de l'axe y pour trois squelettes.

De plus, par construction, nous obtenons l'arrondi des coins, ou en anglais Corner Rounding (CR) pour chaque motif : il s'agit des rayons de courbure situés aux points terminaux du squelette ou aux points de changement de direction de l'axe du squelette. Par exemple pour le motif illustré en bleu foncé, les valeurs de CR observées sont de 7.7 nm pour le haut et de 8.3 nm pour le bas du motif. Il est à noter que quelle que soit l'inclinaison du motif ou de la présence ou non d'une éventuelle courbure, la valeur du CR est obtenue de la même manière, ce qui facilite l'analyse.

**Signature des primitives** Il est possible pour chaque primitive de calculer les valeurs moyennes de rayon ainsi que leur variabilité. La figure 4.16 montre ces valeurs pour l'ensemble des primitives de la figure 4.7. Les 8 premiers squelettes correspondent aux zones de pente sur cette image, ils possèdent tous un rayon moyen de l'ordre de 4.0 nm et une variabilité très faible de 0.5 nm.

Nous voyons donc ici que le squelette permet de généraliser la notion de CD en autorisant la mesure sur n'importe quel type de structure. En outre, elle permet la mesure du CR de manière très simple.

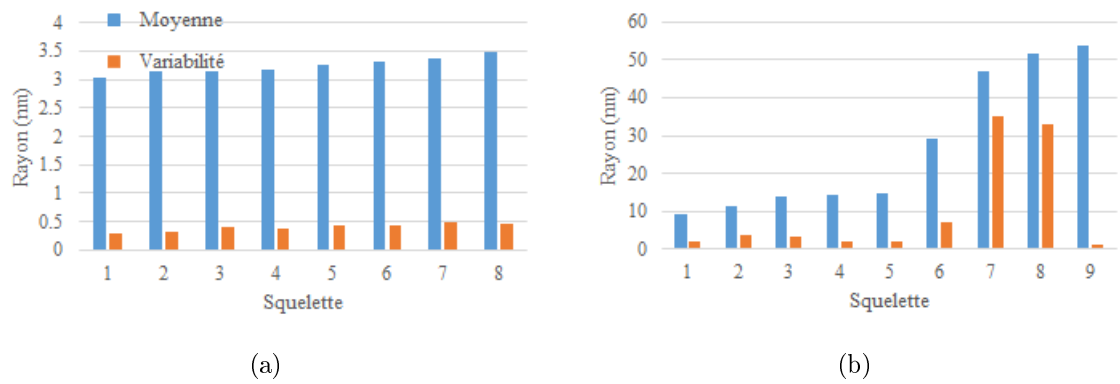


FIGURE 4.16: Moyenne et écart type du rayon du squelette de chaque zone présentes sur la figure 4.7a pour (a) les 8 zones de pentes et (b) pour les zones d'altitudes constantes (AOI).

Dans la sous-section suivante, nous allons faire un aparté sur une analyse que nous avons mise au point dans le but de trier automatiquement des images SEM.

#### 4.4.3 Traitement de masse

Au cours de cette thèse, nous avons fait face à des lots d'images très nombreux et il était nécessaire de trier les images selon leur similarité. Par exemple, sur une série de 700 images portant sur la même structure prises à des endroits différents sur plaquette, nous souhaitons voir comment se disperse la géométrie des structures sur plaquette.

Pour répondre à cette problématique, la manière classique consiste à effectuer des mesures CD et regarder la dispersion obtenue. Néanmoins, cette méthode se base sur un point de mesure précis et il faut connaître, avant analyse, l'endroit où la structure sera susceptible d'être le plus variable. En outre, il est possible que des modifications surviennent à plusieurs endroits.

La méthode que nous avons mise au point permet de s'affranchir de tout point de mesure et ne requiert donc pas de connaître à l'avance les points de déformation des structures. Celle-ci consiste à calculer la distance entre 2 images, et ce, pour chacune des images de notre lot. Cette distance représentera la dissimilarité qu'il peut y avoir entre une image  $I_1$  et  $I_2$  : plus les images  $I_1$  et  $I_2$  sont dissemblable, et plus leur distance noté  $d(I_1, I_2)$  sera grande. L'objectif est d'obtenir une matrice de distances  $D = [d(I_i, I_j)]_{1 \leq i, j \leq n}$  où  $n$  représente le nombre d'images de

notre lot. Avec cette matrice, nous sommes en mesure d'utiliser des algorithmes de classification pour trier les données.

Dans l'article [74], nous avons proposé comme distance l'erreur résiduelle d'alignement entre les 2 images. Nous avons défini une erreur d'alignement entre les 2 images comme étant égale à la moyenne des distances entre ensembles de points. L'ensemble des points peuvent être soit les points constituant les contours des motifs, soit les points constituant le squelette des motifs. L'alignement consiste alors simplement à minimiser cette erreur. Dans l'article nous avons notamment observé que l'ensemble de points qui permettaient d'avoir le meilleur alignement était celui se basant sur les squelettes. Lors du processus d'alignement, l'erreur finale n'est jamais nulle (sauf si les ensembles de points des 2 images sont strictement égales) et cette valeur résiduelle est utilisée comme distance les 2 images.

Nous sommes donc en mesure, pour notre ensemble d'images, d'obtenir une matrice de distance  $D = [d(I_i, I_j)]_{1 \leq i, j \leq n}$ . Il est alors possible de classer hiérarchiquement les données selon leur proximité. Le résultat est visible à la figure 4.17a.

Il s'agit d'un arbre phylogénétique qui représente les distances entre images. Plus les images sont rapprochées dans l'arbre et plus elles présenteront des similarités. Cette caractéristique nous permet de regrouper les images partageant des formes similaires. Dans l'exemple étudié, nous avons été en mesure de créer 4 groupes principaux. En vert est illustré le motif correctement imprimé. En rouge, nous avons des structures dont la pointe n'a pas été imprimée. Enfin les catégories orange et bleu sont constituées de structures dont la pointe est partiellement résolue. La position des structures sur plaquette est visible à la figure 4.17c ce qui peut permettre d'identifier très facilement les conditions problématiques.

Cette méthode permet ainsi de trier un grand nombre d'images sans aucune connaissance initiale de ce qui est présent, ou non, sur les images. Elle permet de détecter si les images prises ont le même nombre de structure : il est parfois possible qu'un motif ne s'imprime pas et alors l'image se retrouve excentrée par rapport à celle qui ont bien toute les structures, rendant possible son identification. Un autre avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas de boîte de mesure puisqu'elle se base sur les images entières pour fonctionner.

## 4.5 Conclusion

Nous avons vu au cours de ce chapitre comment, dans un premier temps, nous préparons l'image en vue de l'analyser. Un nouveau filtre nommé filtre de Nagao pondéré a été mis au point et présente des qualités similaires aux filtres NL-mean tout en étant 17 fois plus rapide. Pour corriger la non-uniformité de l'intensité à l'échelle de l'image, une correction a été mise en place avant l'application d'un détecteur de contours.

Pour finaliser la préparation de l'image, nous avons mis en place un nouvel algorithme de détection de la topographie au sein de l'image.

Une fois les zones d'intérêts identifiées, la mise en place des mesures est possible. En particulier, l'utilisation du squelette topologique nous a permis de contrôler des structures autrement impossibles à mesurer avec une mesure CD. L'ensemble de ces travaux se trouve à la référence [74].

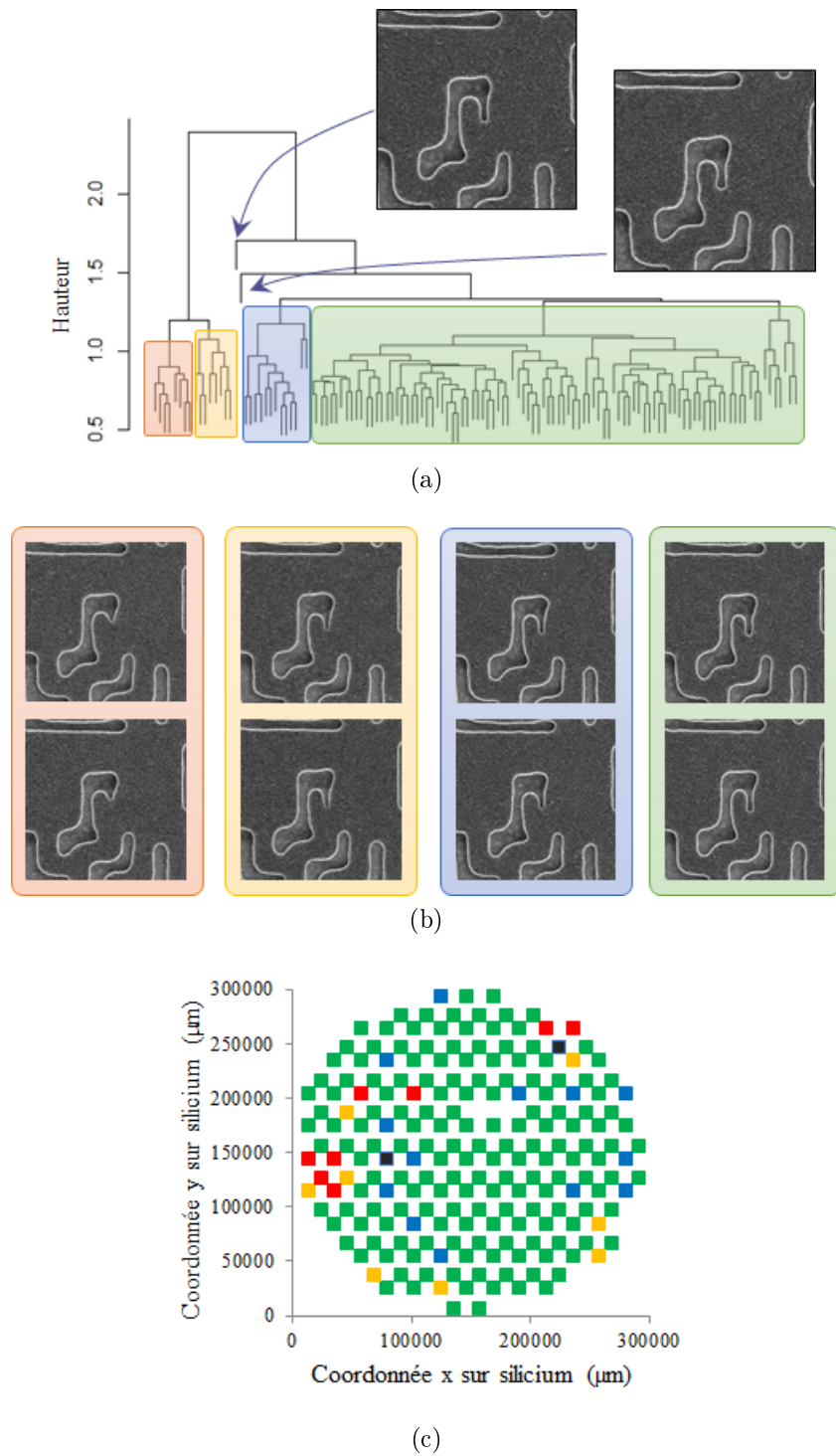


FIGURE 4.17: Regroupement hiérarchique des images en se basant sur la matrice des distances. (a) Représentation à l'aide d'un arbre phylogénétique. (b) Exemple d'images utilisées dans (a). (c) Positions des images sur plaquettes.





# Chapitre 5

## Application à un niveau d'interconnexion 10 nm

Dans ce chapitre nous nous intéressons au niveau back-end 10 nm pour appliquer les méthodes mises en place dans les chapitres précédents afin de définir les règles de dessin pour le niveau VIA.

La première section de ce chapitre sera consacrée à la présentation des variabilités associées à ces procédés. Nous décrirons aussi comment utiliser le squelette topologique comme estimateur de placement pour prédire la position des contacts spécifiques au procédé DSA. Dans la seconde partie nous verrons comment les règles de dessin sont générées pour interdire les configurations où le critère de fiabilité n'est pas respecté.

### 5.1 Variabilités associées aux techniques utilisées

Dans ce chapitre, toutes les valeurs de variabilités sont des écart-types.

#### 5.1.1 Procédé SIT

En utilisant une optimisation Source-Masque (SMO) et avec ce procédé, la variabilité de largeur de ligne  $\sigma_W$  peut-être prise égale à 1.2 nm (tiré de [41]) et la variabilité de placement  $\sigma_{D,SIT}$  est prise comme étant nulle.

### 5.1.2 Procédé DSA

Pour le procédé DSA, des études récentes ont montré que la variabilité du rayon des contacts  $\sigma_R$  est égale à 0.8 nm [44, 75] et l'erreur de placement associée à la chimie du BCP  $\sigma_{d,DSA}$  est de 0.66 nm [76].

Pour obtenir la variabilité liée au guide  $\sigma_{d,GP}$ , nous avons vu dans le chapitre précédent qu'elle était égale à 1.8 nm. Cette dernière contribution est attribuée à la variabilité de l'impression du guide qui cumule à la fois les effets de la lithographie et de la gravure. Enfin, l'erreur de recouvrement entre les deux niveaux (appelée en anglais overlay error)  $\sigma_{d,OVL}$  est estimée à 2.0 nm selon les spécifications du noeud technologique 10 nm.

Pour calculer la variabilité du placement  $\sigma_d$ , nous supposons que chacune des contributions est indépendante et nous obtenons alors :

$$\sigma_d^2 = \sigma_{d,DSA}^2 + \sigma_{d,GP}^2 + \sigma_{d,OVL}^2 + \sigma_{d,SIT}^2 \quad (5.1)$$

L'indépendance des variables étant quelque chose de relativement difficile à démontrer nous ne le ferons pas (d'autant plus que les variabilités copolymère et guide sont à priori liées). En utilisant les valeurs précédentes nous obtenons une variabilité de placement  $\sigma_d$  égale à 2.8 nm.

### 5.1.3 Traduction du critère statistique

Nous avons maintenant, à disposition, toutes les données nécessaires pour le calcul du déplacement maximal tolérable présenté au chapitre 2 que nous utilisons comme critère. Pour récapituler, nous avons les valeurs de variabilités suivantes :

$$\begin{aligned} \sigma_W &= 1.2 \text{ nm} \\ \sigma_R &= 0.8 \text{ nm} \\ \sigma_d &= 2.8 \text{ nm} \end{aligned}$$

En utilisant ces valeurs, nous obtenons une erreur de placement moyen maximale admissible  $d_{max}$  de 2.8 nm (voir 3.6 pour les détails du calcul). Nous avons donc notre critère de positionnement moyen du contact final par rapport au dessin initial. Ainsi, toute structure possédant une erreur de placement supérieure à notre

seuil sera interdite à l'aide d'une règle de dessin. Par exemple, à la figure 2.16, les écarts entre design et contacts finaux, dans le cas du guide idéal, sont tous inférieurs à la valeur seuil. En revanche, dans le cas du guide déformé, les 2 contacts extrêmes ont un écart supérieur à notre limite et la configuration devra être interdite par une règle de dessin.

## 5.2 Création des structures de tests

Une fois munis de ce critère, il nous faut maintenant concevoir des structures de tests. Dans le cas du procédé DSA, il est possible de n'avoir qu'un ensemble limité de motifs à imprimer, les guides, et cet ensemble va former une librairie de motifs que nous allons présenter dans la première sous-section. Nous avons ensuite utilisé cette librairie pour générer des structures de tests représentant des règles de dessin que nous décrirons dans la deuxième sous-section.

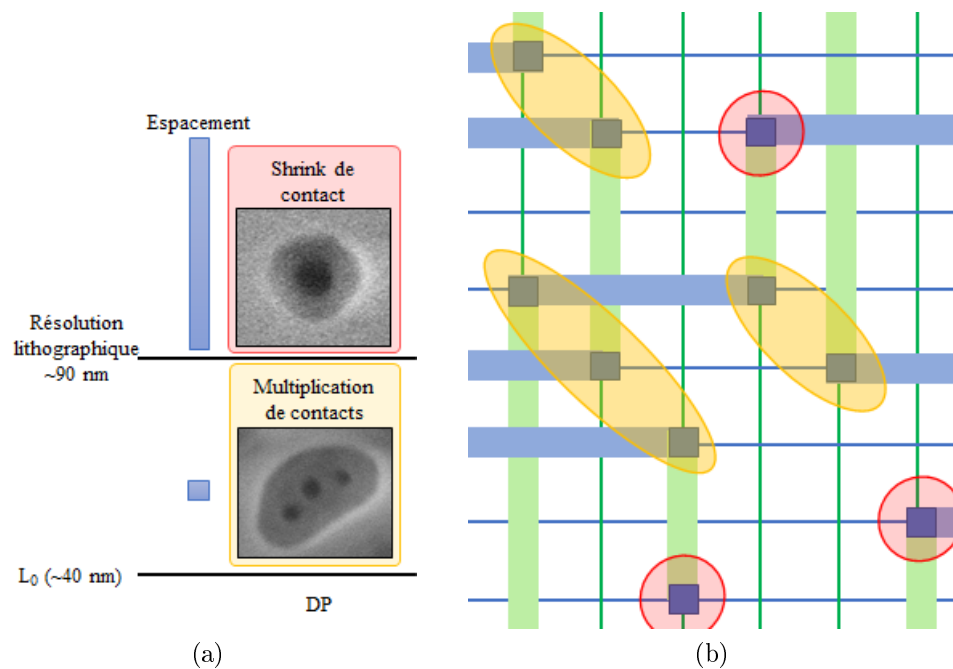


FIGURE 5.1: Utilisation du procédé DSA pour l'impression des contacts. (a) Type de guide employé en fonction de la distance entre les contacts. Les images SEM ont été prises après gravure du PMMA (étape 5 représentée sur la figure 2.11e). (b) Exemple des guides à imprimer pour l'obtention des contacts. En jaune sont représentés les cas de multiplications de contacts et en rouge les cas de shrink de contact.

### 5.2.1 Librairies de guides

Nous regroupons les VIA adjacents pour former un guide comme illustré sur la figure 5.1. Si le VIA est isolé, c'est à dire si son plus proche voisin est à une distance supérieure à la résolution du scanner, on parle dans ce cas de réduction de contact ou encore de contact shrink (représenté en rouge). Si plusieurs VIA sont adjacents, ils sont regroupés au sein d'un même guide et on parle alors de multiplication de contact (représenté en jaune). Nous avons fait le choix dans cette étude de ne considérer des VIA adjacents que sur les diagonales et nous n'autoriserons pas de VIA à la verticale où l'horizontale d'un autre pour limiter le nombre de configurations.

En répertoriant l'ensemble des guides nécessaires à l'impression d'un niveau VIA d'une cellule de test 10 nm dont les éléments sont automatiquement positionnés et reliés les uns aux autres, nous avons observé que plus de 99% des guides peuvent être classifiés en quatre primitives représentées sur la figure 5.2 : 81,9% sont des VIA isolés, 15,1% sont des doublets, 1,5% sont des triplets de formes triangulaires, 1,1% sont des triplets et enfin 0,5% seulement ont plus de 4 VIA. Dans notre étude, nous avons choisi de ne travailler qu'avec des guides formant au plus 3 VIA pour des raisons de variabilité : plus le guide est complexe et plus les positions des contacts à l'intérieur du guide seront variables. De plus, en faisant ce choix, nous couvrons plus de 99% des cas rencontrés et des études internes ont montré que cela n'entraînait pas de restriction sur la densité des circuits.

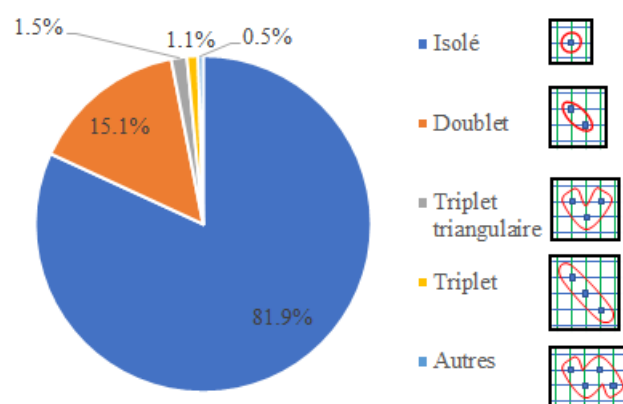


FIGURE 5.2: Répartition des types de guides d'un niveau VIA 10 nm de  $40000 \mu\text{m}^2$ . A droite sont illustrés les motifs les plus représentatifs. Le guide imprimé par l'étape lithographique est illustré en rouge.

Ces guides, ainsi que leurs rotations, seront les seuls à être utilisés et constitueront notre librairie de guides. Au total, nous utiliserons 9 guides. Pour la suite, nous noterons  $g$  un guide quelconque et  $g_i$  un guide appartenant à notre librairie, qui est elle notée  $L = \{g_i, 1 \leq i \leq 9\}$ .

Dans le cas où ces guides sont isolés les uns des autres, leur impression est parfaitement contrôlée et les motifs finaux sont parfaitement positionnés par rapport au design. En pratique, les guides ne sont pas isolés et les voisins vont modifier leur impression par effet de proximité. Il en résulte que, dans certaines configurations, les guides ne vont pas s'imprimer à la bonne position les VIA. Cet effet est illustré à la figure 5.3 où l'on peut voir en haut que les deux guides sont trop proche pour que les motifs soient correctement imprimés. La correction masque est limitée par les contraintes de fabrication et il n'est pas possible de descendre en dessous d'une certaine limite d'espacement entre 2 motifs. La définition des règles de dessin sert donc, ici, à définir les règles de placement de ces primitives entre elles et vont éviter la formation de configurations entraînant une erreur de positionnement trop importante.

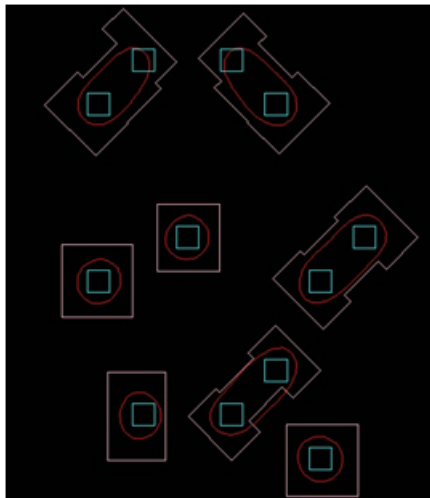


FIGURE 5.3: Illustration de l'effet de proximité. En bleu sont illustrés les VIA, en rose les guides tels qu'ils sont sur masques et enfin les contours rouges représentent les guides sur silicium.

## 5.2.2 Les structures de tests

Ces guides  $g_i$  seront les briques de base des structures de tests que nous allons définir. Pour rappel, à la figure 3.7 nous sommes en présence de 2 guides  $g_u$  et  $g_v$

et nous observons que l'écart de position entre le design d'un VIA et sa simulation est supérieur à notre tolérance. La configuration doit alors être interdite par une règle de dessin.

Notons leur position respective par rapport à l'origine  $\vec{p}_u$  et  $\vec{p}_v$ . Nous sommes en mesure d'avoir la position relative du guide  $u$  par rapport à  $v$  :  $\vec{p}_{u,v} = \vec{p}_u - \vec{p}_v$ . La règle de dessin qui va interdire cette configuration sera alors écrite  $(g_u \& g_v)(\vec{p}_{u,v})$  et peut se lire : interdire  $g_u$  avec  $g_v$  lorsqu'ils sont placés à une position relative  $\vec{p}_{u,v}$ . Dans la section 5.4.1, nous présentons la notation officielle.

Nous allons définir des structures de test qui vont directement représenter une règle de dessin. Par exemple dans le cas illustré à la figure 5.4a, la règle qui permettrait d'interdire cette configuration s'écrit :  $(g_i \& g_j)(\vec{p}_{i,j} = (0,4))$  avec  $i$  égale à 4 et  $j$  égale à 8. Sur la figure 5.4b sont illustrées les positions possibles d'un guide par rapport à un guide central  $i$ . L'indice  $d$  représente la position relative avec un guide  $g$  quelconque et le guide central  $g_i$ . Ainsi, si l'on reprends notre exemple 5.4a, nous obtenons  $(g_i \& g_j)(\vec{d} = \vec{1})$ .

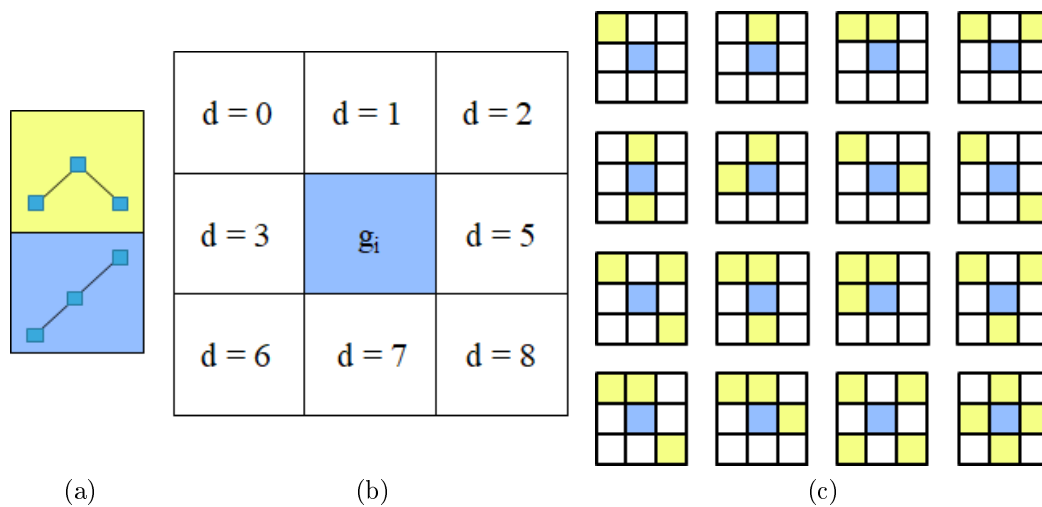


FIGURE 5.4: Structure de tests. (a) Exemple de structure. En bleu est représenté le groupe  $g_i$  et en jaune un élément du groupe  $g_j$ . Dans ce cas il s'agit de groupes ayant 3 contacts. (b) Placement possible des éléments et indices associés. (c) Ensemble des combinaisons testées.

En comptabilisant le nombre de combinaisons qu'il est possible d'obtenir avec ces cadrans, c'est à dire l'ensemble des règles  $(g_i \& g_j)(\vec{d})$  qu'il est possible de tester, nous obtenons  $10^9$  configurations possibles (il faut compter aussi le cas où il n'y a pas de guides). Tester l'ensemble de ces combinaisons n'est pas envisageable et nous avons considéré un nombre restreint de structures de tests qui sont visibles à la figure 5.4c. Le guide central  $i$  est représenté en bleu tandis que les guides

adjacents de type  $j$  sont représentés en jaune. A titre d'illustration, les règles correspondant aux 4 configurations du haut de la figure s'écrivent :

- $(g_i \& g_j)(\overrightarrow{d=0})$
- $(g_i \& g_j)(\overrightarrow{d=1})$
- $(g_i \& g_j)(\overrightarrow{d=0}) \& (g_i \& g_j)(\overrightarrow{d=1})$
- $(g_i \& g_j)(\overrightarrow{d=0}) \& (g_i \& g_j)(\overrightarrow{d=2})$

Une fois ces structures de tests créées, il nous reste à mesurer l'écart entre les VIA du design et leur position réelle après impression comme illustré figure 3.7c. Dans cette étude, nous avons utilisé le squelette topologique comme outil de prédiction du placement des VIA. Dans la section suivante, nous allons présenter son utilisation ainsi que sa précision ainsi et son domaine de validité.

### 5.3 Le squelette comme outil de prédiction

Les guides utilisés sont fortement confinés selon un axe et nous avons constaté que les domaines de PMMA finaux se plaçaient le long du squelette topologique du guide. Il est ainsi possible de prédire le positionnement des contacts à l'aide de cet estimateur de placement. La figure 5.5 illustre la concordance entre la position des centres des contacts et la position du squelette sur des images SEM.

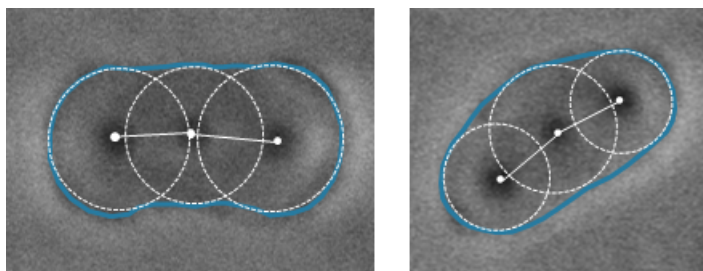


FIGURE 5.5: Images SEM de guide dont la partie PMMA a été gravé. Le contour du guide est illustré en bleu et le squelette du guide est illustré en trait blanc. Les cercles blancs illustrent les frontières des boules maximales.

Pour vérifier cette intuition, nous allons comparer dans la suite le positionnement du squelette par rapport à des simulations rigoureuses du DSA pour connaître la précision du squelette comme outil de prédiction pour le positionnement des domaines de PMMA au sein du guide.



### 5.3.1 Comparaison avec le modèle Ohta-Kawasaki

Le comportement observé lors de la séparation des domaines de PMMA et de PS est similaire à de nombreuses autres situations où un changement de phase a lieu. Dans le cas des rides sur la peau, il a été montré par des chercheurs du MIT que leur formation et leur forme suivent des équations similaires [77]. Dans ce cas la forme des domaines est définie par la courbure de la surface.

La première personne à s'intéresser à ce type de comportement fut Alan Turing (encore lui!) qui en 1952 proposa pour la première fois une explication quant à la formation des motifs réguliers sur les animaux [78].

Des travaux ont suivi permettant de mieux comprendre la formation des motifs observés dans la nature [79] et d'observer dans le sable en vibration des motifs similaires [80], [81].

Mais revenons à nos copolymères à bloc. Ce sont des molécules composées de deux sous chaînes, qui sont des monomères et qui sont reliés entre eux par une liaison covalente. La proportion relative des deux espèces PMMA (représentée figure 5.6a) et PS (représentée figure 5.6b) va induire le type de motif qui va se former. Si la proportion de PMMA est égale à 0.5, il y a alors formation de lamelles et si la proportion est de 0.3, cela entrainera la formation de cylindre composée de PMMA dans une matrice composé de PS. Dans ce cas la chaîne est représentée à la figure 5.6c

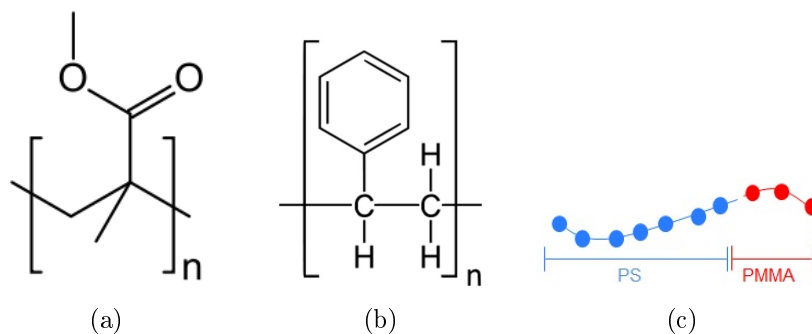


FIGURE 5.6: (a) Représentation d'une chaîne de PMMA (b) ainsi que d'une chaîne de PS. (c) Représentation simplifiée d'un copolymère à bloc.

Dans notre cas, la fraction de PMMA est égale à 0.3 et nous allons utiliser le modèle Ohta-Kawasaki [82] pour simuler la formation des domaines. En se basant sur les implémentations décrites dans [42, 83, 84], le système est représenté par son énergie libre :

$$E[\Psi] = \int_{\Omega} \left( \frac{a}{2} \Psi^2 + \frac{b}{3} \Psi^3 + \frac{c}{4} \Psi^4 + \frac{D}{2} \|\nabla \Psi\|^2 \right) dr \quad (5.2)$$

Où  $\Psi$  définit le paramètre d'ordre du mélange. Il s'agit d'une quantité représentant l'état du mélange. Lorsque celui-ci est nul, il y a au point étudié une même quantité de composant A et B, s'il est égale à -1, il n'y a que de l'élément A et s'il est égale à 1, il n'y a présence que de l'élément B. En prenant en compte la diffusion des espèces, il est possible de simuler l'évolution du système dans le temps à l'aide du potentiel chimique  $\mu$  :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \Delta \mu = \Delta \left( \frac{\partial E}{\partial \Psi} \right) \quad (5.3)$$

Aux frontières nous considérons des conditions de Neumann et l'implémentation se base sur un schéma de différence finie implicite 2D. L'équation d'évolution en fonction du temps va diminuer l'énergie libre du système jusqu'à ce que celui-ci se trouve dans un minimum. On considère à ce moment que la simulation est terminée, et nous en déduisons les domaines de PMMA et de PS.

Les valeurs utilisées ont été prise de [42] où elles ont été calibrées par rapport à l'expérimentation. Nous allons maintenant pouvoir comparer les résultats issus des simulations et du calcul du squelette sur les mêmes guides pour en déduire une plage de validité du squelette comme estimateur de placement.

### 5.3.2 Plage de validité du squelette

Pour effectuer les comparaisons pour un guide  $X$  nous avons employé le fonctionnement suivant :

1. Squelettisation du guide et récupération de la liste de points  $\{(x_B, y_B, R_B), B \in Sk(X)\}$
2. Génération des domaines de PMMA à l'aide du modèle Ohta-Kawasaki. Une regression d'ellipse [67] permet ensuite de connaître les centres des domaines  $\{(x_{PMMA}, y_{PMMA})\}$ .
3. Pour chaque centre  $(x_{PMMA}, y_{PMMA})$ , nous cherchons la distance minimum au squelette du guide  $Sk(X)$  que l'on note  $d(C_{PMMA}, Sk(X))$ .

Sur la figure 5.7 sont représentés plusieurs guides qui ont suivis ces étapes et où l'on peut observer la bonne concordance entre le modèle rigoureux et l'estimateur.

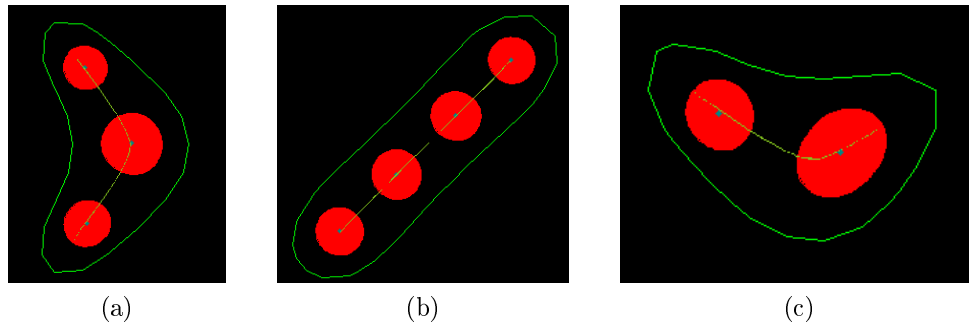


FIGURE 5.7: Comparaison entre le placement des domaines de PMMA simulés à l'aide du modèle Ohta-Kawasaki, représenté en rouge et en vert foncé pour les centres, et le squelette du guide représenté en vert.

En utilisant un BCP avec une périodicité naturelle de 40 nm, la distance moyenne entre les centres des domaines de PMMA et le squelette du guide  $d(C_{PMMA}, Sk(X))$  est de 1.9 nm ce qui est une bonne précision. Comme prévu, le squelette est bien adapté pour représenter les guides confinés.

Néanmoins, nous avons observé sur certaines structures une déviation bien supérieure. La figure 5.8 montre la répartition des erreurs. Nous attribuons cette caractéristique à la non-commensurabilité du guide avec la longueur du BCP selon l'axe normal au squelette 5.10.

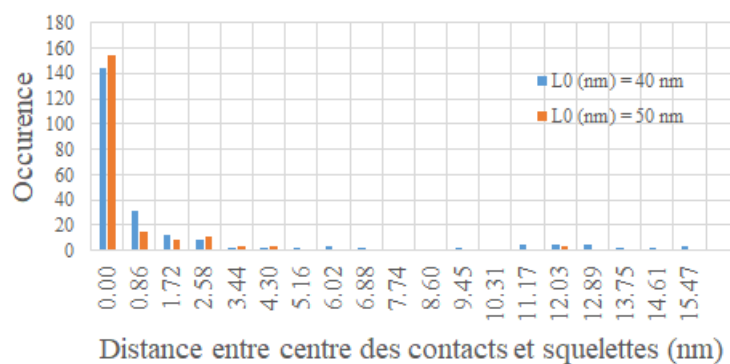


FIGURE 5.8: Répartition des distances entre les centres des domaines de PMMA et des squelettes.

Nous avons représenté à la figure 5.9a, un schéma du positionnement des polymères selon l'axe du squelette d'un guide dans le cas d'un guide confiné. Par construction,

le PMMA sera centré par rapport au centre du guide. Dans un cas moins confiné, comme illustré à la figure 5.10a, le PMMA présentera un décalage par rapport à l'axe du squelette, visible à la figure 5.9b, en raison des interactions des domaines entre eux.

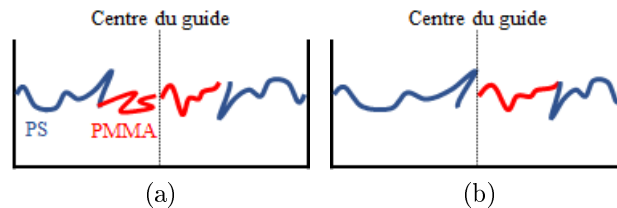


FIGURE 5.9: Positionnement des chaînes de polymères au sein d'un guide. Le domaine de PMMA est centré par rapport au guide. (a) Cas confiné. (b) Cas non confiné.

Pour le vérifier, nous avons effectué les mêmes mesures mais pour un BCP dont la périodicité naturelle est de 50 nm tout en conservant les mêmes structures. En effet, en augmentant la longueur du copolymère à bloc, l'erreur moyenne tombe à 0.9 nm. Cela est illustré sur l'histogramme à la figure 5.8 où la répartition des erreurs est beaucoup plus proche de 0 nm pour une périodicité naturelle de 50 nm (en orange sur la figure) que pour une périodicité de 40 nm (en bleu).

Ainsi plus le guide est confiné selon l'axe normal à son squelette, et plus l'estimateur sera précis. En reportant l'erreur de placement maximale entre le squelette et les contacts au sein d'un guide en fonction de la distance maximale entre le guide lui-même et son squelette comme illustré à la figure 5.10, nous observons deux régimes. Pour une distance maximale entre le guide et son squelette inférieure à 26 nm, l'erreur moyenne n'est plus que de 0.6 nm, même en utilisant le BCP de période 40 nm. Au delà, l'estimateur voit son erreur augmenter de manière importante et il ne peut plus être utilisé comme outil de prédiction pour le placement des domaines de PMMA. Cette situation non souhaitée est illustré à la figure 5.9b.

Pour résumer cette section, le squelette topologique est un bon estimateur de placement si le guide étudié a une largeur maximale par rapport à son squelette de moins de 26 nm. Dans cette thèse, nous avons fait le choix, si la structure a un écart de plus de 26 nm de l'interdire. Pour parvenir à contrôler plus de structures, une possible solution est d'utiliser un autre estimateur si le critère est dépassé. Par exemple, si le nombre de structure à tester est limité en nombre, l'emploi du modèle Ohta-Kawasaki peut être envisagé.

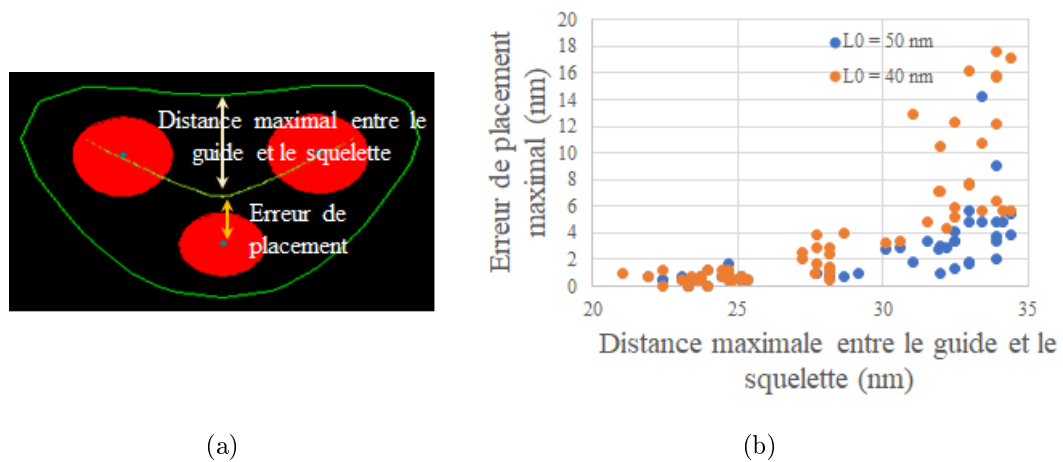


FIGURE 5.10: (a) Erreur de placement entre le squelette et les domaines de PMMA et distance maximale entre le guide et le squelette. (b) Pour chaque guide, l'erreur de placement maximale est représentée en fonction de la distance maximale entre le guide et le squelette.

Dans la section suivante, nous avons utilisé le squelette topologique pour identifier les configurations qui vont générer des VIA dont l'erreur de placement sera supérieure à notre tolérance  $d_{max}$ .

## 5.4 Génération des règles de dessin

Dans cette section nous allons créer un ensemble de règles de dessin en nous basant sur les configurations illustrées à la section 5.2. Pour cela, nous devons mesurer pour chaque configuration l'erreur de placement de chacun des VIA. Si l'une de ces erreurs est supérieure à notre seuil  $d_{max}$ , la configuration est alors considérée comme fautive et elle est interdite à l'aide de la règle qui lui est associée.

### 5.4.1 Résultats

Nous avons reporté à la figure 5.11, le nombre d'environnements fautifs en fonction de l'écart systématique admissible. Par exemple, si on considère une tolérance  $d_{max}$  de 13 nm, situation illustrée par la flèche verte, cela induit 4 configurations fautives dont le guide central est défini par la structure triangulaire.

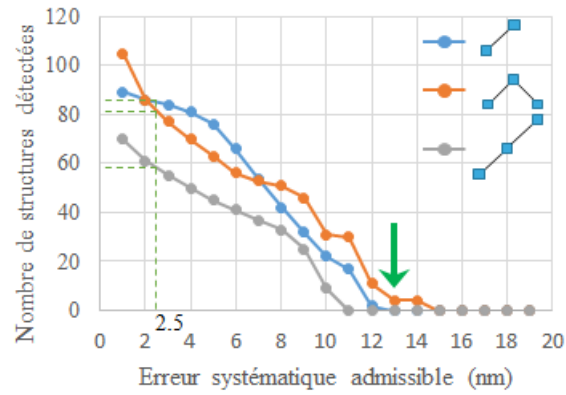


FIGURE 5.11: Evolution du nombre de règles de dessins pour chacun des groupes d'interactions en fonction de l'erreur systématique tolérée.

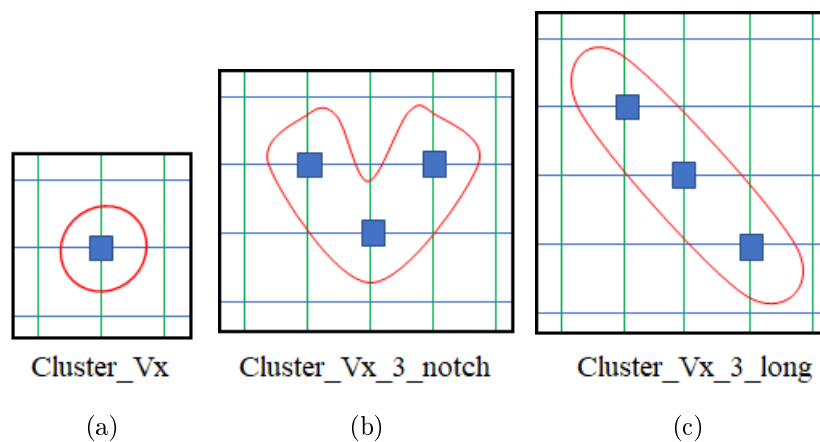


FIGURE 5.12: Exemple de définition de groupes.

Dans le cas étudié, notre tolérance est de 2.5 nm, ce qui est illustré par la ligne pointillée verte. En se référant au graphique, nous obtenons un nombre total de règles égal à 224. La diminution de la variabilité des procédés étudiés et donc l'augmentation de l'écart systématique admissible entraîne une diminution du nombre de règles comme observé sur le graphique 5.11.

Pour illustration, voici 3 règles que nous avons obtenues. Il faut au préalable définir les géométries que l'on utilise et qui sont visibles à la figure 5.12 :

- Cluster\_Vx = Vx upsized + 24nm
- Cluster\_Vx\_3 = Cluster\_Vx interact exacty 3 Vx
- Cluster\_Vx\_3\_notch = Cluster\_Vx\_3 with notch
- Cluster\_Vx\_3\_long = Cluster\_Vx\_3 not Cluster\_Vx\_3\_notch

Le premier item définit un contact comme un carré de largeur 24 nm. Le deuxième item définit un groupe composé de 3 contacts en interaction. Les deux derniers items définissent les structures illustrées sur la figure 5.11 en orange et en gris. Finalement voici un exemple de 2 règles de dessin dont la deuxième est visible à la figure 5.13 :

- Cluster\_Vx edge exact length = 48nm
- Vx within Cluster\_Vx\_3\_notch center to center space to Vx within Cluster\_Vx\_2 (not checked over Cluster\_Vx)  $\geq 96$ nm

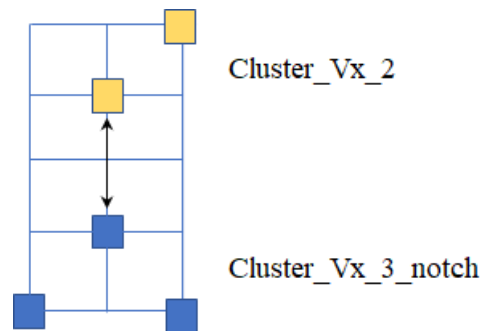


FIGURE 5.13: Exemple d'une règle de dessin.

#### 5.4.2 La percolation comme moyen de vérification du set de règles

Les règles de dessin obtenues plus haut assurent que le critère de recouvrement est bien vérifié pour l'ensemble des configurations qui ont été utilisées. En utilisant ces règles pour un niveau, nous n'avons néanmoins pas de certitude quant à la possible apparition d'interconnexion fautive : une configuration non testée pourrait très bien se révéler problématique et venir mettre en défaut notre critère. La raison étant qu'en ayant utilisé un nombre limité de configurations, la couverture des possibilités n'est pas totale.

Il nous faut donc un moyen de vérifier si notre ensemble de règles permet ou non de vérifier le critère de fiabilité. Pour cela, nous avons utilisé la percolation pour générer de manière aléatoire des VIA tout en respectant les règles de dessin.

Par rapport aux sections précédentes, nous allons changer la manière dont nous représentons le niveau contact : le niveau est visualisé comme une grille et un carré de cette grille est coloré si un contact est présent. La figure 5.14a montre comment passer de la représentation réelle à la représentation simplifiée.

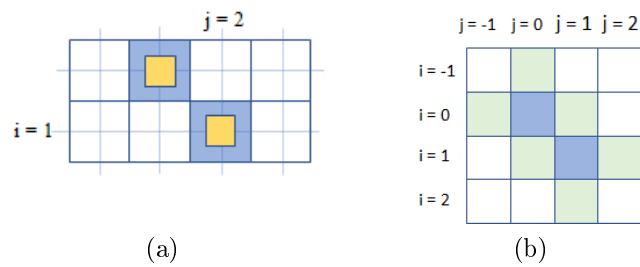


FIGURE 5.14: (a) Représentation de la grille contenant les contacts. (b) Niveau de contrainte  $C_1$  pour le groupe  $g_1$  qui est représenté en bleu. Les positions interdites sont illustrées en vert.

Celle ci va nous permettre de mieux comprendre le processus de génération du niveau. En effet, nous allons de manière itérative ajouter des contacts tout en s'assurant qu'il y a bien création d'un groupe  $g_i$  autorisé et que toutes les règles de dessins sont vérifiées.

Nous allons détailler le fonctionnement de l'algorithme. Un contact  $C$  contient deux variables de position  $x$  et  $y$ . Un groupement quelconque de contacts  $g$  est un graphe dont les sommets sont les contacts et dont les arêtes sont entre contacts adjacents.

L'utilisation de la représentation en graphe permet de simplifier la reconnaissance des groupes. En supposant connue une librairie de groupement  $g_i$ , on peut alors trouver le type pour n'importe quel groupe de cluster  $g$  en trouvant à quelle groupement  $g_i$  il est isomorphe. Cette représentation permet aussi d'agglomérer plusieurs groupe de contact pour n'en former qu'un seul et en déduire si ce groupe résultant est valide (c'est à dire, faisant partie de la librairie  $g_i$ ).

Pour un niveau, qui est une grille rectangulaire  $(x_j, y_i)_{0 < i \leq n_i, 0 < j \leq n_j}$ , nous allons pour chaque case du niveau, essayer d'ajouter un contact. Pour que cette opération soit effectuée, plusieurs conditions doivent être vérifiées :

1. Un nombre entre 0 et 1 est tiré aléatoirement, si ce nombre est supérieur à une certaine valeur  $p$ , alors le contact n'est pas placé.
2. Si l'ajout du contact entraîne la création d'un groupe non conforme (non présent dans la librairie), alors il n'est pas placé.
3. Si l'ajout du contact entraîne la violation d'une règle de dessin, alors il n'est pas placé.



La répétition de ce processus sur un niveau complet permet la création d'un niveau contact de manière aléatoire tout en respectant les règles de dessin qui ont été obtenue précédemment. Finalement, nous pouvons compter le pourcentage de VIA vérifiant notre critère de déplacement. Dans notre cas, nous avons obtenu un pourcentage de structures fautives égal à 0.004 %, ce qui est bien en dessous de notre critère.

**Résumé** Au chapitre 2 nous avons vu que le critère statistique de recouvrement entre contacts et lignes métalliques impose un déplacement systématique maximal du contact par rapport à la ligne.

En utilisant des tirages aléatoires, nous avons vu qu'il était possible de déterminer cette tolérance maximale en fonction des variabilités des différents procédés mis en jeu pour l'impression des motifs.

La création de structures de tests représentant des règles de dessins a permis d'interdire la formation de motifs présentant un écart supérieur à la tolérance obtenue. Enfin, pour vérifier la cohérence des règles de dessins ainsi obtenues, nous avons généré de manière aléatoire un niveau contact pour s'assurer que le critère de déplacement maximal était bien respecté. Si toutefois des jonctions devaient apparaître avec un écart supérieur à notre tolérance, les configurations seraient alors ajoutées aux règles de dessin pour les interdire.

Ainsi notre étude a abouti à la mise en place de quatre programmes distincts :

1. Traduction du critère de recouvrement en terme de déplacement maximal tolérable via des tirages aléatoires.
2. Création de structures de tests représentant des règles de dessin.
3. Simulation du placement des VIA et évaluation de l'écart entre Design et placement estimée. Cette étape aboutit à la création des règles de dessins.
4. Vérification des règles via une génération aléatoire du niveau contact.

En utilisant les configurations interdites nous générons ensuite un niveau contact. Après avoir simulé les squelettes et les avoir comparés au design, nous obtenons dans notre cas un pourcentage de structures fautives qui dans notre cas est suffisamment bas, ce qui indique que notre ensemble de règles de dessins est robuste.

Si tel n'avait pas été le cas, il aurait fallu ajouter des règles de dessin pour interdire les configurations fautives et refaire fonctionner la génération aléatoire.



# Chapitre 6

## Conclusion

Ces travaux de thèse ont porté sur la co-optimisation possible entre le design et l'OPC. Actuellement, les performances optiques des scanners ne suivent plus les attentes en terme de résolution et il est donc nécessaire de comprendre finement les processus en jeu pour permettre la réduction des motifs imprimés.

Il est de plus nécessaire d'assurer la fiabilité de ces dispositifs, quels que soient les procédés physiques employés pour imprimer un circuit. Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés à un critère de fiabilité qui, pour limiter les effets d'électromigrations au niveau des interconnexions, demande d'avoir au moins 99,99366% des jonctions entre VIA et lignes métalliques ayant une aire de recouvrement suffisante.

Dans le cas du procédé DSA, il n'y avait de pas de solution disponible pour mettre en place des règles de dessin garantissant ce critère. Nous avons donc mis en place un ensemble de solutions techniques pour parvenir à créer un ensemble robuste de règles de dessin.

Dans un premier temps, nous avons traduit ce critère statistique qui porte sur une aire en un critère de déplacement moyen maximal admissible à l'aide de tirages aléatoires : en prenant en compte l'ensemble des variabilités du système, il est possible d'obtenir un déplacement moyen du VIA par rapport à la ligne métallique, pour lequel 99,99366% des structures ont une aire supérieure à l'aire de référence. Une fois ce critère de déplacement établi, nous avons généré des structures de tests qui vont servir à établir des règles de dessin. Sur ces structures de tests, nous avons simulé le positionnement des contacts et comparé leur placement par rapport au design. Les structures possédant des contacts dont l'erreur de positionnement est

supérieure à notre critère de déplacement moyen, engendrent la création de règles de dessin en vue de les interdire.

Le jeu de règles ainsi créé doit être vérifié pour s'assurer que le critère statistique est bien respecté. Pour cela, nous avons mis au point un processus de génération aléatoire de niveau contact tout en prenant soin de respecter les règles précédemment établies. Une fois le niveau généré, nous vérifions le positionnement de chacun des contacts et si le critère statistique n'est pas vérifié, alors nous interdisons autant de structures que nécessaire pour garantir le critère de fiabilité.

Ce schéma de génération de règles de dessin est très général et peut s'appliquer à n'importe quel type de procédés. Dans notre cas, nous avons choisi de l'appliquer à deux techniques d'impressions avancées qui sont le SIT pour l'impression des lignes métalliques et le DSA pour l'impression des contacts. Pour mettre en place la méthodologie, nous avons dans un premier temps cherché à quantifier les variabilités propres aux techniques employées pour en déduire une erreur systématique maximale admissible de 2.8 nm.

Nous avons ensuite utilisé le squelette topologique dans le cadre spécifique du DSA pour prédire le positionnement des contacts sur le test des structures pour l'établissement des règles de dessin. Pour vérifier le critère statistique, nous avons enfin utilisé la percolation pour vérifier qu'au moins 99.99366 % des structures vérifiaient notre critère.

Le nombre de règles de dessin étant important, nous avons vu que l'application d'un OPC spécifique au DSA permettait de diminuer le nombre de règles créées.

Au vu de l'importance de la variabilité dans l'étude, il était nécessaire de l'étudier de manière expérimentale. Pour cela, nous avons mis au point une analyse automatisée des images SEM qui a conduit à la mise au point de solutions innovantes : un nouveau filtre pour réduire le bruit des images SEM, un algorithme pour détecter les altitudes dans l'image et l'utilisation du squelette comme outil de mesure.

Parmi les applications de ce travail, la plus importante semble être la possibilité de mesurer et donc de contrôler des structures complexes à l'aide du squelette topologique. La mesure des variabilités est aussi primordiale pour l'établissement de règles qui sont utilisées pour définir les circuits. A l'avenir, nous espérons voir se développer des outils de mesure automatisés permettant de contrôler de telles structures en production.

## Perspectives de recherche

Dans notre étude, nous avons établi des règles en fonction des variabilités procédées existantes pour garantir un critère de fiabilité mais qui aurait pu être un critère de densité ou autre. Il serait intéressant de pouvoir procéder de manière inverse : à partir d'un ensemble de règles, établir les variabilités contribuant le plus aux règles. Cela permettrait d'affiner le procédé de fabrication sur des points précis.

Pour continuer ces travaux de recherche, nous avons cherché à améliorer la marge procédé en optimisant les paramètres procédés tels que les pentes de gravures, les dimensions des lignes par exemple. Les règles de dessins sont décrites par des équations faisant appel à des variables qui sont des paramètres procédés et des paramètres de variabilité. L'exemple suivant montre comment est calculé une règle  $GR_i$  :

$$GR_i = \sum_j (p_{ij} - c_{ij}) + \sqrt{\sum_k v_{ik}^2 + t_{ovl}^2} \quad (6.1)$$

Les paramètres de cette équation sont les variables d'un procédé de fabrication (ou PA pour Process Assumption)  $p_{ij}$  utilisés par la règle, des constantes  $c_{ij}$ , les variabilités des PA  $v_{ik}$  et un terme d'erreur d'alignement  $t_{ovl}$ .

Cette valeur calculée de règle doit rester inférieure à un seuil noté  $T_i$ . La quantité  $M_i = T_i - G_i$  donne la valeur de marge du procédé et plus celle-ci est grande et plus le procédé est robuste. Pour une technologie, le nombre  $n$  de règles peut avoisiner les 300 et par règle, le nombre de paramètres associés est d'environ 8. Ainsi, il faut trouver le meilleur jeu de variables permettant de maximiser l'ensemble des marges.

L'objectif est donc de trouver un ensemble de variables  $p_{ij}$  et  $v_{ik}$  tel que l'ensemble des marges  $M_i$  soit maximum avec la condition supplémentaire qu'elles doivent être positives.

Une première approche consisterait à chercher le maximum de la fonction :

$$f = \sum_i c_i M_i^2 \quad (6.2)$$

Où  $c_i$  est un simple facteur de pondération associé à la règle  $i$ . Le principal problème avec cette formulation est que lors de la recherche du maximum par les méthodes classiques, nous ne pouvons pas garantir le signe de la quantité  $M_i$ .

Ces études peuvent faire l'objet d'un sujet de recherche dont l'enjeu est l'amélioration des marges procédés ainsi que l'identification des paramètres les plus influents sur le design.

## Perspectives d'applications

Parmis les applications à la suite de cette thèse, nous pouvons noter tout d'abord la plateforme d'analyse mise en place qui permet la récupération automatisée d'informations statistiques, quel que soit le type de motifs étudiés. Celle-ci permettra en particulier d'établir la variabilité de nombreux procédés de manière très simple.

Une autre application porte sur la génération aléatoire d'un niveau en respectant des règles de dessin. Actuellement, des structures de tests sont dessinées mais elles ne couvrent qu'une partie des possibilités offertes par le design. Ainsi, la solution mise en place permet de tester un espace beaucoup plus grand. Ces travaux se sont concentrés sur un niveau VIA mais pourraient être étendus à d'autres niveaux.

Une autre amélioration possible des travaux effectués porte sur la prédiction du positionnement des centres des domaines de PMMA au sein d'un guide. Nous avons vu au cours de cette étude que le squelette était un outil précis dans le cas où le guide est confiné. En revanche, lorsque le guide n'est pas confiné selon une dimension, il faudrait trouver une alternative pour prédire le positionnement des domaines. Dans l'article [85], nous avons commencé à élaborer une solution se basant sur l'observation relativement simple que la probabilité de trouver du PMMA est fonction de la distance avec le bord du guide. Néanmoins, pour conforter le modèle établi, de plus amples investigations seront nécessaires.

# Bibliographie

- [1] Philippe Matherat. Une histoire de la microélectronique. *unknown*, unknown, 2007.
- [2] Peter B Beaumont, Robert G Bednarik, et al. Tracing the emergence of palaeoart in sub-saharan africa. *Rock Art Research : The Journal of the Australian Rock Art Research Association (AURA)*, 30(1) :33, 2013.
- [3] Adedeji B Badiru and LeeAnn Racz. *Handbook of Measurements : Benchmarks for Systems Accuracy and Precision*. CRC Press, 2015.
- [4] Georges Ifrah, Edward Frank Harding, David Bellos, Sophie Wood, et al. *The universal history of computing : From the abacus to quantum computing*. John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [5] René Taton. Sur l’invention de la machine arithmétique. *Revue d’histoire des sciences et de leurs applications*, pages 139–160, 1963.
- [6] Blaise Pascal. Machine d’arithmétique. 1645.
- [7] Alexander Y Nitussov, Georg Trogemann, and Wolfgang Ernst. *Computing in Russia : the history of computer devices and information technology revealed*. Springer Science & Business, 2001.
- [8] Robert Ligonnière. *Préhistoire et histoire des ordinateurs : des origines du calcul aux premiers calculateurs électroniques*. R. Laffont, 1987.
- [9] Henri Lilen and Roland Moreno. *Une (brève) histoire de l’électronique*. Vuibert, 2003.
- [10] Eric Hobsbawm. The age of revolution. *Europe*, 1848 :1789–1848, 1789.
- [11] Allan G Bromley. Charles babbage’s analytical engine, 1838. *Annals of the History of Computing*, 4(3) :196–217, 1982.

- 
- [12] Dany-Jack Mercier. Mathématiques et codes secrets. *CreateSpace Independent Publishing Platform Charleston*, 2014.
- [13] Brian Randell. From analytical engine to electronic digital computer : The contributions of ludgate, torres, and bush. *Annals of the History of Computing*, 4(4) :327–341, 1982.
- [14] Alan Mathison Turing. On computable numbers, with an application to the entscheidungsproblem. *Proceedings of the London mathematical society*, 2(1) : 230–265, 1937.
- [15] Gregory H Moore. Hilbert and the emergence of modern mathematical logic. *Theoria : An International Journal for Theory, History and Foundations of Science*, pages 65–90, 1997.
- [16] Frédéric Veille and Frédéric Leterreux. *Histoires insolites du Débarquement*. City Editions, 2014.
- [17] Herman H Goldstine and Adele Goldstine. The electronic numerical integrator and computer (eniac). *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*, 2(15) :97–110, 1946.
- [18] William T Moye. Eniac : the army-sponsored revolution. *US Army Research Laboratory (ARL), January*, 1996.
- [19] Joel Birnbaum and R Stanley Williams. Physics and the information revolution. *Physics Today*, 53(1) :38–43, 2000.
- [20] Brian Randell. *On Alan Turing and the origins of digital computers*. University of Newcastle upon Tyne, Computing Laboratory, 1972.
- [21] Jonathan Grudin. Three faces of human-computer interaction. *IEEE Annals of the History of Computing*, 27(4) :46–62, 2005.
- [22] John H Bruning. Optical lithography : 40 years and holding. In *Proc. SPIE*, volume 6520, page 652004, 2007.
- [23] Computer history museum. URL <http://www.computerhistory.org/revolution/digital-logic/12/287/1609>.
- [24] Computer history museum. URL <http://www.computerhistory.org/revolution/digital-logic/12/287/1614>.



- [25] Neil HE Weste and David Money Harris. *CMOS VLSI design : a circuits and systems perspective*. Pearson Education India, 2005.
- [26] Andrew M Volk, Peter A Stoll, and Paul Metrovich. Recollections of early chip development at intel. *Intel Technology journal*, 2001.
- [27] Robert R Schaller. Moore’s law : past, present and future. *IEEE spectrum*, 34(6) :52–59, 1997.
- [28] K. Kuwahara, R. Mendez, and S.A. Orszag. *Supercomputers and Fluid Dynamics : Proceedings of the First Nobeyama Workshop September 3–6, 1985*. Lecture Notes in Engineering. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 9783642829086. URL [https://books.google.fr/books?id=\\_x34CAAQBAJ](https://books.google.fr/books?id=_x34CAAQBAJ).
- [29] Yield Enhancement. International technology roadmap for semiconductors, 2012.
- [30] Mark Neisser and Stefan Wurm. Itrs : 2012 update overview. *Advanced Optical Technologies*, 4(4) :235–240, 2012.
- [31] Harry J Levinson. *Principles of lithography*, volume 146. SPIE press, 2005.
- [32] Jean-Gabriel Simiz. *Approche holistique du contrôle du focus en photolithographie 193nm immersion pour les niveaux critiques en 28nm et 14nm FD-SOI*. PhD thesis, Université de Lyon, 2016.
- [33] V. Bakshi. *EUV Lithography*. SPIE Press monograph. Society of Photo Optical, 2009. ISBN 9780819469649. URL <https://books.google.fr/books?id=91XeKLC9MUEC>.
- [34] Amanda Martinez-Gil. *Nanostructuration de surfaces de silicium pour guider la croissance auto-organisée de nanostructures métalliques*. PhD thesis, Université Paris Sud-Paris XI, 2005.
- [35] Mark Neisser and Stefan Wurm. Itrs lithography roadmap : 2015 challenges. *Advanced Optical Technologies*, 4(4) :235–240, 2015.
- [36] AN Broers, ACF Hoole, and JM Ryan. Electron beam lithography—resolution limits. *Microelectronic Engineering*, 32(1) :131–142, 1996.
- [37] Jae-Seok Yang, Katrina Lu, Minsik Cho, Kun Yuan, and David Z Pan. A new graph-theoretic, multi-objective layout decomposition framework for double

- patterning lithography. In *Proceedings of the 2010 Asia and South Pacific Design Automation Conference*, pages 637–644. IEEE Press, 2010.
- [38] Kun Yuan, Jae-Seok Yang, and David Z Pan. Double patterning layout decomposition for simultaneous conflict and stitch minimization. *IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems*, 29(2) : 185–196, 2010.
- [39] Peter Evanschitzky, Alex Burenkov, and Jurgen Lorenz. Double patterning : Simulating a variability challenge for advanced transistors. In *Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD), 2013 International Conference on*, pages 105–108. IEEE, 2013.
- [40] Paul Zimmerman. Double patterning lithography : double the trouble or double the fun? *SPIE Newsroom*, 20, 2009.
- [41] V Farys, L Depre, J Finders, V Arnoux, Y Trouiller, HY Liu, E Yesilada, N Zeggaoui, and C Alleaume. Enabling 22-nm logic node with advanced ret solutions. In *SPIE Advanced Lithography*, pages 79730T–79730T. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [42] Sylvain Moulis. *Lithographie par division de pas de réseau pour les circuits logiques avancés*. PhD thesis, INSA de Lyon, 2014.
- [43] Mark Neisser and Stefan Wurm. Itrs lithography roadmap : 2013 challenges. *Advanced Optical Technologies*, 4(4) :235–240, 2013.
- [44] Chris Bencher, He Yi, Jessica Zhou, Manping Cai, Jeffrey Smith, Liyan Miao, Ofir Montal, Shiran Blitshtein, Alon Lavi, Kfir Dotan, et al. Directed self-assembly defectivity assessment. part ii. In *SPIE Advanced Lithography*, pages 83230N–83230N. International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [45] Hsinyu Tsai, Jed W Pitera, Hiroyuki Miyazoe, Sarunya Bangsaruntip, Sebastian U Engelmann, Chi-Chun Liu, Joy Y Cheng, James J Bucchignano, David P Klaus, Eric A Joseph, et al. Two-dimensional pattern formation using graphoepitaxy of ps-b-pmma block copolymers for advanced finfet device and circuit fabrication. *ACS nano*, 8(5) :5227–5232, 2014.
- [46] A. Srivastava, D. Sylvester, and D. Blaauw. *Statistical Analysis and Optimization for VLSI : Timing and Power*. Integrated Circuits and Systems.

- Springer US, 2006. ISBN 9780387265285. URL <https://books.google.fr/books?id=epK0sDvckK8C>.
- [47] Ban P Wong, Anurag Mittal, Greg W Starr, Franz Zach, Victor Moroz, and Andrew Kahng. *Nano-CMOS Design for Manufacturability : Robust Circuit and Physical Design for Sub-65nm Technology Nodes*. John Wiley & Sons, 2008.
- [48] N. Einspruch. *VLSI Handbook*. Handbooks in Science and Technology. Elsevier Science, 2012. ISBN 9780323141994. URL <https://books.google.fr/books?id=67ySVNwaFucC>.
- [49] Yuelin Du, Zigang Xiao, Martin DF Wong, He Yi, and H-S Philip Wong. Dsa-aware detailed routing for via layer optimization. In *SPIE Advanced Lithography*, pages 90492J–90492J. International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [50] Zigang Xiao, Yuelin Du, Haitong Tian, Martin DF Wong, He Yi, and H-S Philip Wong. Dsa template optimization for contact layer in 1d standard cell design. In *SPIE Advanced Lithography*. International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [51] Michael C Smayling, Christopher Bencher, Hao D Chen, Huixiong Dai, and Michael P Duane. Apf pitch-halving for 22nm logic cells using gridded design rules. In *Proc. SPIE*, volume 6925, pages 69251E–1, 2008.
- [52] Christopher Bencher, Huixiong Dai, and Yongmei Chen. Gridded design rule scaling : taking the cpu toward the 16nm node. In *SPIE Advanced Lithography*, pages 72740G–72740G. International Society for Optics and Photonics, 2009.
- [53] Gert R Strobl and Gert R Strobl. *The physics of polymers*, volume 2. Springer, 1997.
- [54] Kwanghui Lim. The many faces of absorptive capacity : spillovers of copper interconnect technology for semiconductor chips. *Industrial and Corporate Change*, page dtp044, 2009.
- [55] Charles Chiang and Jamil Kawa. *Design for manufacturability and yield for nano-scale CMOS*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [56] Nicholas Metropolis and Stanislaw Ulam. The monte carlo method. *Journal of the American statistical association*, 44(247) :335–341, 1949.

- [57] Amine Lakcher, Bertrand Le-Gratiet, Julien Ducoté, Pierre Fanton, Ton Kiers, Jan-Willem Gemmink, Stefan Hunsche, Christopher Prentice, and Maxime Besacier. Robust 2d patterns process variability assessment using cd-sem contour extraction offline metrology. In *SPIE Advanced Lithography*, pages 1014514–1014514. International Society for Optics and Photonics, 2017.
- [58] Francois Weisbuch and Aravind Samy Naranaya. Assessing sem contour based opc models quality using rigorous simulation. In *SPIE Advanced Lithography*, pages 90510A–90510A. International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [59] Frank P Kuhl and Charles R Giardina. Elliptic fourier features of a closed contour. *Computer graphics and image processing*, 18(3) :236–258, 1982.
- [60] Antoni Buades, Bartomeu Coll, and J-M Morel. A non-local algorithm for image denoising. In *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, volume 2, pages 60–65. IEEE, 2005.
- [61] Makoto Nagao and Takashi Matsuyama. Edge preserving smoothing. *Computer graphics and image processing*, 9(4) :394–407, 1979.
- [62] Antoni Buades, Bartomeu Coll, and Jean-Michel Morel. A review of image denoising algorithms, with a new one. *Multiscale Modeling & Simulation*, 4 (2) :490–530, 2005.
- [63] Chris A Mack and Benjamin D Bunday. Improvements to the analytical linescan model for sem metrology. In *SPIE Advanced Lithography*, pages 97780A–97780A. International Society for Optics and Photonics, 2016.
- [64] John Canny. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 6(6) :679–698, 1986.
- [65] Lior Rokach and Oded Maimon. Clustering methods. In *Data mining and knowledge discovery handbook*, pages 321–352. Springer, 2005.
- [66] Ali Al-Sharadqah, Nikolai Chernov, et al. Error analysis for circle fitting algorithms. *Electronic Journal of Statistics*, 3 :886–911, 2009.
- [67] Radim Hahř and Jan Flusser. Numerically stable direct least squares fitting of ellipses. In *Proc. 6th International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization. WSCG*, volume 98, pages 125–132. Citeseer, 1998.

- [68] Øivind Due Trier, Anil K Jain, and Torfinn Taxt. Feature extraction methods for character recognition—a survey. *Pattern recognition*, 29(4) :641–662, 1996.
- [69] Martin Madaras, Michal Piovarčí, Jana Běhal Dadová, Roman Franta, and Tomáš Kovačovský. Skeleton-based matching for animation transfer and joint detection. In *Proceedings of the 30th Spring Conference on Computer Graphics*, pages 91–98. ACM, 2014.
- [70] Jaehwan Kim and Il-Kwon Jeong. Single image-based 3d tree and growth models reconstruction. *ETRI Journal*, 36(3) :450–459, 2014.
- [71] Dominique Attali. *Squelettes et graphes de Voronoi 2D et 3D*. PhD thesis, UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER—GRENOBLE, 1995.
- [72] Gulshan Goyal and Ritika Luthra. Skeleton generation for digital images based on performance evaluation parameters. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 9(2) :47–58, 2016.
- [73] Zicheng Guo and Richard W Hall. Parallel thinning with two-subiteration algorithms. *Communications of the ACM*, 32(3) :359–373, 1989.
- [74] L Schneider, V Farys, E Serret, and C Fenouillet-Beranger. Framework for sem contour analysis. In *SPIE Advanced Lithography*, pages 1014513–1014513. International Society for Optics and Photonics, 2017.
- [75] Xin-Yu Bao, He Yi, Christopher Bencher, Li-Wen Chang, Huixiong Dai, Yongmei Chen, P-T Joseph Chen, and H-S Philip Wong. Sram, nand, dram contact hole patterning using block copolymer directed self-assembly guided by small topographical templates. In *Electron Devices Meeting (IEDM), 2011 IEEE International*, pages 7–7. IEEE, 2011.
- [76] Sander F Wuister, Davide Ambesi, Tamara S Druzhinina, Emiel Peeters, Jo Finders, Joanne Klein Wolterink, and Johannes GEM Hans Fraaije. Fundamental study of placement errors in directed self-assembly. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 13(3) :033005–033005, 2014.
- [77] Norbert Stoop, Romain Lagrange, Denis Terwagne, Pedro M Reis, and Jörn Dunkel. Curvature-induced symmetry breaking determines elastic surface patterns. *Nature materials*, 14(3) :337–342, 2015.

- 
- [78] Alan Mathison Turing. The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B : Biological Sciences*, 237(641) : 37–72, 1952.
- [79] AJ Koch and Hans Meinhardt. Biological pattern formation : from basic mechanisms to complex structures. *Reviews of Modern Physics*, 66(4) :1481, 1994.
- [80] Shankar C Venkataramani and Edward Ott. Spatiotemporal bifurcation phenomena with temporal period doubling : Patterns in vibrated sand. *Physical review letters*, 80(16) :3495, 1998.
- [81] Igor S Aranson and Lev S Tsimring. Patterns and collective behavior in granular media : Theoretical concepts. *Reviews of modern physics*, 78(2) : 641, 2006.
- [82] Takao Ohta and Kyozi Kawasaki. Equilibrium morphology of block copolymer melts. *Macromolecules*, 19(10) :2621–2632, 1986.
- [83] Honghu Liu, Taylan Sengul, Shouhong Wang, and Pingwen Zhang. Dynamic transitions and pattern formations for cahn-hilliard model with long-range repulsive interactions. *arXiv preprint arXiv :1106.4004*, 2011.
- [84] Kenji Yoshimoto and Takashi Taniguchi. Large-scale dynamics of directed self-assembly defects on chemically prepatterned surface. In *Proc. SPIE*, volume 8680, page 86801I, 2013.
- [85] L Schneider, V Farys, E Serret, and C Fenouillet-Beranger. New placement estimator for contact hole printed with dsa. In *SPIE Advanced Lithography*, pages 97770M–97770M. International Society for Optics and Photonics, 2016.