



HAL
open science

Implémentation et évaluation de la mesure Overlay in-situ par microscopie électronique pour la production de puces électroniques

Thibaut Bourguignon

► **To cite this version:**

Thibaut Bourguignon. Implémentation et évaluation de la mesure Overlay in-situ par microscopie électronique pour la production de puces électroniques. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2024. Français. NNT : 2024GRALT001 . tel-04558829

HAL Id: tel-04558829

<https://theses.hal.science/tel-04558829>

Submitted on 25 Apr 2024

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : EEATS - Electronique, Electrotechnique, Automatique, Traitement du Signal (EEATS)

Spécialité : Nano électronique et Nano technologies

Unité de recherche : Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Information (LETI)

**Implémentation et évaluation de la mesure Overlay in-situ par
microscopie électronique pour la production de puces électroniques**

**Implementation and evaluation of in-situ overlay measurement by
electron microscopy for microchip production.**

Présentée par :

Thibaut BOURGUIGNON

Direction de thèse :

Nicolas POSSEME

Ingénieur HDR, ST Microelectronics

Directeur de thèse

Bertrand LE GRATIET

Ingénieur-Chercheur, ST Microelectronics

Co-encadrant de thèse

Jonathan PRADELLES

Ingénieur-Chercheur, CEA-Leti

Co-encadrant de thèse

Sébastien BÉRARD-BERGERY

Ingénieur, CEA-Leti

Co-encadrant de thèse

Rapporteurs :

Yves JOURLIN

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, UNIVERSITE DE SAINT-ETIENNE - JEAN MONNET

Thierry GERAUD

PROFESSEUR, EPITA

Thèse soutenue publiquement le **8 janvier 2024**, devant le jury composé de :

Panagiota MORFOULI,

PROFESSEURE DES UNIVERSITES, Grenoble INP

Présidente

Nicolas POSSEME,

INGENIEUR HDR, STMicroelectronics

Directeur de thèse

Yves JOURLIN,

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, UNIVERSITE DE SAINT-ETIENNE - JEAN MONNET

Rapporteur

Thierry GERAUD,

PROFESSEUR, EPITA

Rapporteur

Invités :

Stéfan Landis

INGENIEUR DOCTEUR, UnitySC

Philippe LERAY

Docteur en sciences, IMEC (Institut de micro-électronique et composants)



À mes grand-mères Annick et Rose,
Neb na oar a gavo da ziski

Remerciements

Arrive enfin le moment tant attendu des remerciements, cette dernière étape de rédaction qui traduit la fin de trois ans de travail dans un contexte exceptionnel au sein du laboratoire du CLG du CEA-Leti et de STMicroelectronics Crolles.

Tout d'abord je tiens à remercier chaleureusement les membres du jury. Merci à Youla Morfouli d'avoir présidé ce jury ainsi qu'aux rapporteurs Yves Jurlin et Thierry Géraud pour l'attention que vous avez portés à ce manuscrit et pour la qualité de vos remarques. Un grand merci aux jurys invités, Stefan Landis et Philippe Leray, pour l'expertise de vos questions et pour l'échange de qualité qui s'en est suivi. Pour finir, merci à toi Nicolas Possémé d'avoir accepté de diriger cette thèse, et plus particulièrement merci d'avoir maintenu la direction malgré ton changement de poste.

C'est avec beaucoup d'émotions que je vais passer à l'équipe encadrante. Au moment où j'écris cette partie, cela fait un peu plus quatre mois que j'ai commencé mon nouveau travail en Espagne et autant que j'en repousse la rédaction. Même à l'écrit, il est bien plus dur de dire au revoir que ce dont j'aurais imaginé. Vous le savez déjà, j'ai choisi cette thèse dans un contexte compliqué : en sortie de confinement, avec une très bonne raison de partir à l'étranger mais des frontières fermées, un gel total des embauches sur les postes de type RD... Je vous ai rejoint car j'ai cru en vous dès les premiers entretiens, et pour rien au monde je ne changerais cette décision. J'ai souvent douté de mon choix de sujet, mais jamais de mon encadrement. Ces derniers mois m'ont permis me rendre réellement compte de sa qualité et de prendre un peu de recul. Il va être très difficile de trouver d'aussi bons mentors... Au final l'encadrement que vous m'avez donné sera peut-être une des leçons les plus importantes de ma thèse. Vous avez rapidement cru en moi, vous m'avez laissé la liberté de mener mon sujet où je le souhaitais tout en me guidant suffisamment pour que je sache toujours où aller. Vous avez identifié mes qualités mais aussi mes défauts (à anticipation ?) et vous avez su les prendre en compte : la preuve, j'ai presque fini la thèse dans les temps. Je n'aurais jamais été capable de finir cette thèse sans votre soutien. Tout cela sans mentionner la relation amicale que l'on a pu nouer au cours de ces trois ans : ces repas, ces conférences, ces quelques bars

et autres activités avec vous me manquent déjà, mais je ne suis pas inquiet : on a encore une session de kitesurf et de ski à planifier, et vous serez toujours les bienvenus en Espagne.

Je pourrais essayer de faire un discours à la hauteur de ceux de Jonathan, mais vous l'avez bien vu à ma soutenance, je n'en suis pas bien capable (maudites larmes). Jo, Bertrand, Séb, encore merci pour ces trois années exceptionnelles, j'espère qu'on arrivera à se revoir régulièrement et à travailler ensemble dans le futur !

Ensuite, je tiens à remercier mes collègues de ST et du Leti avec qui j'ai partagé ces trois années. Merci à l'équipe de métrologie de m'avoir accueilli et formé en début de thèse. En particulier Régis pour ton encadrement au top lors de ma première année et tous les conseils et astuces que tu as pu me donner qui m'ont servi les trois années. Cette thèse n'aurait pas pu voir le jour sans vous l'équipe de métro-litho, plus précisément merci à toi Julien pour avoir partagé ton expertise SEM ainsi qu'à Florent et Damien pour tous ces conseils vis-à-vis de la mesure overlay optique. Merci à toi Nicolas pour ces discussions SEM et bonne continuation dans ta nouvelle carrière d'ingénieur. Côté lithographie, merci à vous Maxime et Benjamin d'avoir réussi à dégager du temps pour discuter modélisation et APC. Je profite de ce moment pour vous remercier Joséphine et Pauline pour toutes ces petites pauses agréables à ST où, en plus de décompresser, vous m'avez apporté une vision réaliste du travail d'ingénieur process qui m'a beaucoup servi et qui me sert encore. Et pour finir avec la partie Crolles, merci à l'équipe RET de m'avoir aussi bien accueilli ainsi que pour les différents services rendus tout au long de la thèse. Merci Romain pour toutes ces simulations post litho les manipulations de masques sans lesquelles cette thèse n'aurait pas eu lieu.

Je vais enfin pouvoir remercier le laboratoire de lithographie du Leti où j'ai passé la majorité de mon temps. Un grand merci à Guido et Jérôme pour vos conseils, questions et corrections qui m'ont permis d'avancer avec rigueur. Pour conclure avec les meilleurs, merci au CLG ! Je ne pourrais pas tous vous nommer mais c'était extraordinaire de travailler avec vous dans d'aussi bonnes conditions (malgré un toit qui s'effondre). En plus de la microélectronique, j'ai beaucoup appris auprès de vous : entre le management agile (et bienveillant) mené par Aurélien, la rigueur scientifique poussée par Elie, l'implémentation pythonesque par Loïc et l'humour boomer de Jessy j'ai reçu une super préparation pour ma future carrière, et je vous en suis très reconnaissant.

Les jeunes du 2e étage 4123 ; merci pour ces pauses inestimables pendant la rédaction et pour toutes ces soirées endiablées au loco. J'espère avoir l'occasion de vous revoir tous lors de mes retours à Grenoble. Enfin, bon courage aux thésards et j'attends votre pot de

soutenance avec impatience (Gaby tu es particulièrement visé ici) !

Pour conclure, merci à tous mes proches de m'avoir accompagné et fait de ce doctorat un très bon souvenir. Tout d'abord merci à mes parents. Si je suis arrivé jusqu'ici c'est grâce à vous, grâce à l'éducation et à l'ambition que vous m'avez donné. Merci à mon frère et à ma sœur, pour votre compréhension et pour participer à combler le trou que je laisse en partant à un bon millier de kilomètres. Merci à mon père, à Jacky, Véronique, Elena, Benjamin et Coline pour votre présence lors de ma soutenance. Ce fut un véritable plaisir et soulagement de vous avoir en ce jour si important.

Encore merci Benjam' et Co' pour toutes ces escales à Lyon et divers weekend montagne. Des potes en or, avec une exceptionnelle manie de déménager en fonction de mon aéroport de destination !

Ces remerciements n'auraient pas de sens si je ne t'incluais pas Elvire, je ne crois avoir passé autant de temps avec une personne qu'avec toi au cours de ces trois dernières années, et le tout en toute simplicité ! C'était vraiment top de travailler avec toi dans ce bungalow, et je te souhaite que du bonheur dans ta nouvelle vie qui arrive à grand pas ;). En parlant de co-thésarde, Lucie, merci pour tous ces conseils de grande sœur de thèse et pour toutes ces super soirées jeux, les confinements me manqueraient presque ! Un grand merci à toutes les deux pour ces 3 superbes années passées ensemble. Nous connaissant Elvire et moi, je compte sur toi Lucie pour nous rappeler à l'ordre afin qu'on s'organise des weekends tous les trois !

Quitter Grenoble n'a pas été facile, mais quitter la Bourganaz a été bien plus dur : merci à toi Lucas pour toutes ces moments passés ensemble. Je ne vais pas m'étendre ici, mais ton apport à cette thèse est loin d'être négligeable et sache que sans toi je ne suis pas bien sûr que je serais resté sur Grenoble trois ans. Hâte de venir te voir à Munich !

Pour finir, *muchas gracias* à toi Elena pour ton soutien inconditionnel malgré la distance et tes propres examens, pour avoir accepté de faire les sacrifices nécessaires et pour m'avoir donné la force de terminer ce projet. Après avoir fini proprement mes études sur Grenoble, on va finalement pouvoir commencer sereinement cette vie ensemble que l'on a tant attendu ! Un grand merci à *mis suegros* qui se sont si bien occupés de moi pendant ces années. Félicitation à toi Clara, désormais docteur !

C'est une page qui se tourne, et j'espère n'avoir oublié personne. Un immense merci à toutes les personnes qui ont été présentes à mes côtés tout au long de cette aventure. Votre soutien inconditionnel et vos encouragements ont joué un rôle essentiel dans la réalisation de

ce projet. Je suis profondément reconnaissant pour chacun de vous et pour toutes les façons dont vous avez enrichi mon parcours.

Abstract

Les circuits intégrés sont fabriqués via un empilement de diverses couches. L'alignement précis de ces niveaux, dit « overlay (OVL) », est critique pour assurer la fiabilité des puces. Les spécifications sont très strictes : sur une plaque de 300mm de diamètre, chaque motif doit être aligné avec une précision de quelques nanomètres. Les méthodes actuelles, basées sur l'observation optique de mires dédiées, montrent leurs limites en termes de représentativité et d'évaluation de la variabilité locale.

Cette thèse propose une approche novatrice, exploitant la microscopie électronique à balayage (SEM), afin de mesurer avec précision ces variations locales et d'appréhender les biais induits par les mires. Pour cela, un algorithme innovant permettant la mesure de l'overlay à partir de contours SEM a été développé. Par le recalage de contours de référence sur les contours extraits, l'overlay est mesuré directement sur le produit, nécessitant de mire spécifique, même en présence de niveaux partiellement masqués.

Suite à l'évaluation de cette méthode sur des images synthétiques, son application sur des plaques de production a permis de quantifier la variabilité locale de l'overlay sur le produit, de mettre en évidence les écarts par rapport aux mesures en ligne, tout en révélant les limites de la métrologie SEM-OVL.

Integrated circuits are manufactured via a stack of various layers. The precise alignment of these layers, known as "overlay" (OVL), is critical to chip reliability. The specifications are very strict : on a 300mm-diameter wafer, each pattern must be aligned to within a few nanometres. Current methods, based on optical observation of dedicated test patterns, show their limitations in terms of representativeness and assessment of local variability. This thesis proposes an innovative approach, using scanning electron microscopy (SEM), to accurately measure these local variations and to understand the biases induced by the test patterns. To this end, an algorithm for measuring the overlay from SEM contours has been developed. By registering reference contours on the extracted contours, the overlay is measured directly on the product, without the need for a specific test pattern, even in the presence of partially masked levels. Following the evaluation of this method on synthetic images, its application to production wafers enabled us to quantify the local variability of the overlay on the product, highlighting deviations from on-line measurements, while revealing the limits of SEM-OVL metrology.

Table des matières

Introduction générale	1
1 Fabrication des puces électroniques et métrologie overlay	5
1.1 Vue d'ensemble du procédé de fabrication de puces	6
1.1.1 Du transistor au circuit intégré	6
1.1.2 Procédé de fabrication	11
1.1.3 Innovations pour les nœuds avancés	13
1.2 Plan de contrôle en micro-électronique	15
1.2.1 Règles de dessin et métriques de suivi	16
1.2.2 Métrologie en ligne	20
1.2.3 Cas particulier de l'overlay	23
1.3 Métrologie overlay	29
1.3.1 Mesure optique (Opt-OVL)	30
1.3.2 Mesure électronique (SEM-OVL)	38
1.4 Positionnement de la thèse et objectifs	46
1.4.1 Contexte industriel	46
1.4.2 Objectifs	47
2 Développement des dispositifs de mesures overlay SEM	49
2.1 Microscope électronique à balayage (MEB)	50
2.1.1 Principe de fonctionnement	50
2.1.2 Limitations du SEM	54
2.1.3 Équipements à disposition	55
2.1.4 Extraction de contours	56
2.1.5 Images SEM synthétiques	58
2.2 Solutions développées de métrologie de l'overlay sur le produit	63
2.2.1 Objectifs et contraintes	64
2.2.2 Mesure basée sur le Barycentre d'une Référence Réalignée (BRR)	66

2.2.3	Mesure basée sur le Barycentre du Contour Extrait (BCE)	67
2.3	Développements remarquables	69
2.3.1	Utilisation avancée de SIMPL	69
2.3.2	ImageLab	70
2.3.3	Implémentation d'un algorithme robuste en Python	71
3	Évaluation des performances de l'algorithme de mesure développé	75
3.1	Étude et réduction du bruit algorithmique de la mesure BRR	77
3.1.1	Optimisation de l'algorithme de recalage	77
3.1.2	Évaluation des performances sur des images SEM synthétiques	80
3.1.3	Étude de la robustesse vis-à-vis des paramètres SEM et d'extraction de contour	83
3.1.4	Impact de la rugosité	86
3.2	Validation sur les mirettes optiques de référence	88
3.2.1	Plan d'expérience	89
3.2.2	Évaluation des performances	90
3.2.3	Variation de l'overlay au sein de la mire	91
3.3	Application de l'algorithme BRR sur la SRAM	92
3.3.1	Plan d'expérience	93
3.3.2	Comparaison avec les mesures de référence	95
3.3.3	Évaluation expérimentale de l'incertitude	98
3.3.4	Mise en évidence de l'impact des bords fixes	99
3.3.5	Validation de l'hypothèse sur images synthétiques	101
3.3.6	Extraction de contour bi-niveaux	102
3.4	Conclusions	105
4	Application industrielle de la métrologie overlay SEM	107
4.1	Mesures denses de l'overlay dans le produit	109
4.1.1	Plan d'expérience	109
4.1.2	Analyse des mesures brutes	111
4.1.3	Corrélations avec la mesure optique	113
4.1.4	Comparaison des algorithmes BRR et BCE	117
4.1.5	Détermination d'une signature intra-puce	118
4.2	Utilisation industrielle des mesures SEM OVL	122
4.2.1	Modélisation hybride SEM - Optique	122
4.2.2	Implémentation de la mesure OVL sur la ligne de production	129
4.3	Mesure haute tension dans la SRAM	132

4.3.1	Contexte	132
4.3.2	Plan d'expérience	134
4.3.3	Résultats des mesures	136
4.3.4	Analyse de la représentativité des mires optiques	137
4.4	Conclusions	141
5	Conclusions et perspectives	143
5.1	Conclusion générale	143
5.2	Perspectives	146
5.2.1	Amélioration de la qualité d'image	146
5.2.2	Prise en compte des distorsions SEM	147
5.2.3	Avenir de l'algorithme BRR	148
5.2.4	Détection automatique des motifs pour la mesure dans le produit . .	151
5.2.5	Utilisation de la mesure SEM au sein de STMicroelectronics	151
	Bibliographie	153
	Annexe A Corrélations avec les mesures optiques	164
	Annexe B OVL puce par puce	165
	Annexe C Distributions overlay résiduels	166
	Annexe D Résiduels par modèle	168
	Lexique	171

Introduction générale

Les dernières années ont démontré de façon claire à l'Europe sa dépendance technologique et industrielle, en particulier en matière de fabrication de puces électroniques. En réponse, la commission européenne a publié le 8 février 2022 le premier plan de l'Europe pour redevenir indépendant pour sa production de semi-conducteurs : c'est l'European Chips Act [1]. En effet, si l'Europe excelle en recherche grâce à ses laboratoires scientifiques, l'industrie des semi-conducteurs a décroché de la course à la miniaturisation dès les années 2010. La loi de Moore représentée Figure 1 énonce dès 1965 que le nombre de transistors présents sur un circuit doublera tous les 18 mois, et cela grâce à la miniaturisation du pas entre deux motifs (*pitch*) [2, 3]. Cependant, la complexité de développer de nouveaux équipements de lithographie - le principal limitant à la miniaturisation - a mené à une attente de 13 ans entre la mise en production de la lithographie 193 nm par immersion et celle de son successeur à extrême ultraviolet (EUV). Pour suivre la marche dictée par la loi de Moore et par les feuilles de routes de l'International Technology Roadmap For Semiconductor [4], les fondeurs asiatiques et américains ont déployé des moyens colossaux nécessitant des investissements sans précédent. Les fondeurs européens ont alors arrêté la miniaturisation aux nœuds dit 28 nm autour des années 2010 et se sont concentrés sur des marchés plus diversifiés : c'est la stratégie du More-than-More (MtM). L'objectif est alors clair : le bon rendement, le coût relativement faible ainsi que la fiabilité des nœuds moins avancés rendent ces technologies attractives pour d'autres secteurs de marché. En particulier l'électronique grand public, mais aussi l'automobile et le spatial qui demandent une très grande fiabilité des puces : à près de 1000 puces par voitures, si une puce sur 1 million est défectueuse, alors 1 véhicule sur 1000 aurait statistiquement une puce défectueuse !

Un très bon contrôle du procédé de fabrication est alors nécessaire. Plus précisément, l'overlay (OVL) qui désigne l'erreur d'alignement entre deux niveaux d'une puce est l'une des principales sources de défaillance d'une puce. Comme le montre la Figure 1, les spécifications overlay se durcissent à un rythme plus rapide que ne décroît la taille des motifs. Ce phénomène est d'autant plus vrai pour les applications MtM où la tolérance sur l'alignement peut atteindre 5 nm sur un nœud 28 nm. Pour assurer un contrôle précis et répétable, cet alignement est

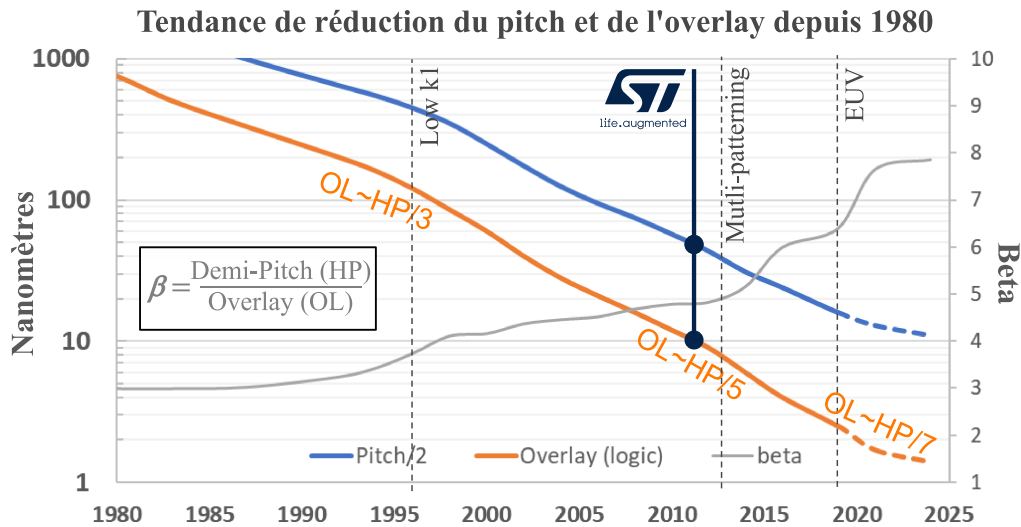


FIGURE 1 Tendance de la réduction du pitch depuis les années 1980 suivant la loi de Moore. Les spécifications d'overlay durcissent d'autant plus rapidement avec l'arrivée de nouveaux procédés. La grandeur β représente la difficulté grandissante du contrôle de l'overlay avec la diminution du pas entre deux motifs (pitch). Adaptée de [3].

traditionnellement mesuré optiquement sur des mires dédiées. Les spécifications sont alors définies empiriquement pour satisfaire la fiabilité et le rendement souhaité du produit. Cette stratégie occulte le comportement interne et local des puces fabriquées : l'overlay mesuré en ligne de production diffère de celui observable au niveau des dispositifs actifs de la puce comme illustré Figure 2. On suspecte en effet ce dernier d'avoir un biais vis-à-vis de l'overlay en ligne et de masquer les variabilités locales. Cela expliquerait le besoin d'attribuer empiriquement des spécifications sur la mesure en ligne de l'overlay pour assurer la fiabilité de la puce et le rendement de la fonderie.

Le travail de cette thèse se concentre sur la mesure de l'overlay au sein de la puce et sans mire dédiée, à l'aide des microscopes électroniques à balayage actuellement disponibles à STMicroelectronics. Cette dernière contrainte nous mènera dans un premier temps à développer des nouvelles méthodes de mesure à l'aide de post-traitement, qui seront ensuite caractérisées puis appliquées sur les produits issus de la ligne de production industrielle.

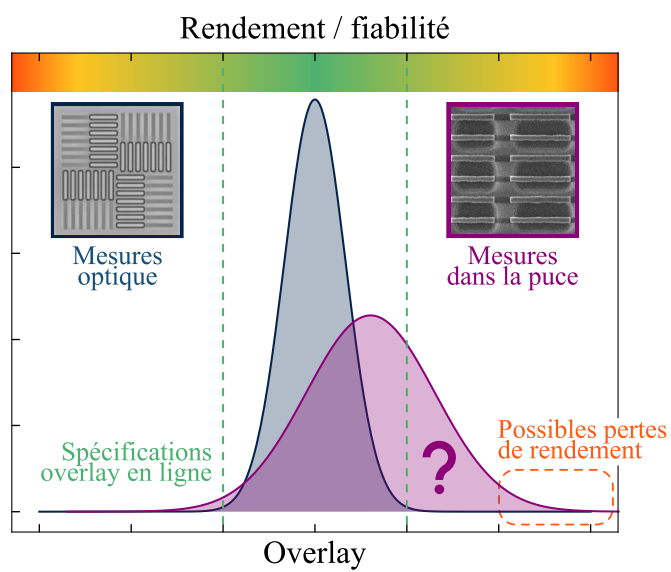


FIGURE 2 L'overlay mesuré en ligne diffère de celui observable au niveau des dispositifs actifs de la puce. On suspecte l'overlay sur la puce d'avoir un biais et une dispersion plus élevée, ce qui entraîne des valeurs d'overlay localement élevées qui peuvent conduire à une perte de rendement et de fiabilité de la puce.

Chapitre 1

Fabrication des puces électroniques et métrologie overlay

Introduction de chapitre

Le premier chapitre a pour but de présenter de manière simplifiée les notions nécessaires à la compréhension de ce manuscrit ainsi que d'exposer le contexte de la thèse afin d'explicitier ses objectifs.

Dans un premier temps, une vue d'ensemble du **procédé de fabrication de puces électroniques** sera présentée. Après un court historique du transistor MOS et du circuit intégré, cette section détaillera l'architecture du dispositif et mettra en avant l'importance des interconnexions pour réaliser des fonctions complexes. Le procédé de fabrication de ces puces sera alors détaillé pour permettre au lecteur d'appréhender les enjeux et défis rencontrés pendant la thèse. Finalement la dernière partie sera dédiée au besoin de miniaturisation des dimensions des transistors, qui a mené à l'utilisation à STMicroelectronics de la technologie SOI.

Dans un second temps, ce chapitre abordera le **plan de contrôle** mis en place en micro-électronique pour fournir des puces de dimensions réduites tout en assurant une fiabilité et un rendement élevé. Cette section explicitera les **métriques utilisées** ainsi que la notion de métrologie en ligne avant de se concentrer sur la **métrologie overlay** où les efforts de cette thèse ont été focalisés. Une attention particulière sera portée sur la mesure de l'overlay par SEM, de l'anglais *Scanning Electron Microscope*.

Enfin, cette partie se conclura sur une définition précise des **objectifs de la thèse** et de la **problématique** adressée par le manuscrit.

1.1 Vue d'ensemble du procédé de fabrication de puces

L'invention du transistor en 1947 dans les Laboratoires Bell par John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley a révolutionné l'électronique moderne [5]. De part leur faible dimension, légèreté et faible consommation, les transistors ont rapidement remplacé les tubes électroniques et ont permis la miniaturisation des composants électroniques. La première utilisation du transistor pour le grand public fut pour la radio en 1954 : le *Regency TR-1* de Texas Instruments, premier récepteur radio contenant quatre transistors bipolaires, offrait une autonomie environ cinq fois plus longue que les radios à tubes pour une qualité audio légèrement inférieure [6]. Trois ans plus tard IBM sort le premier ordinateur basé sur cette technologie [7]. L'invention en 1958 du circuit intégré par Jack S. Kilby (Texas Instruments) et Robert Noyce (Fairchild Semiconductor) est une seconde révolution. En permettant à des milliers de transistors de fonctionner sur un même support, le circuit intégré permet la fabrication du premier microprocesseur en 1969. Depuis, les transistors sont omniprésents dans les appareils du quotidien, notamment dès lors qu'une fonction logique est nécessaire [8].

1.1.1 Du transistor au circuit intégré

Le transistor est un dispositif à trois électrodes actives. Fonctionnant comme un interrupteur, il permet de contrôler le passage du courant entre deux électrodes en appliquant une tension sur la troisième électrode. L'association de ces dispositifs permet de réaliser des portes logiques pour réaliser de simples opérations. La Figure 1.1 montre le symbole électronique d'un transistor et schématise le circuit d'une porte logique NON-ET dite NAND, une structure de base des micro-contrôleurs. La miniaturisation du transistor a permis son intégration par milliards sur une seule puce et l'obtention de performances toujours plus élevées. Les derniers nœuds technologiques démontrent en effet une densité de 91.2 transistors par μm^2 (N7 de TSMC) [9]. Pour appréhender la finesse d'un tel procédé une analogie est nécessaire : le diamètre d'un cheveu étant d'une centaine de micromètres, il serait possible d'intégrer jusqu'à 700 000 transistors sur l'aire d'un seul cheveu. Cette extrême miniaturisation permet la création de puce de plus en

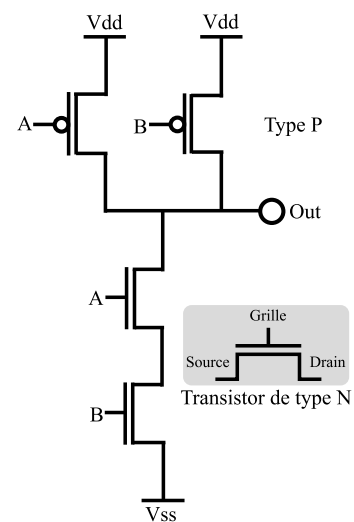


FIGURE 1.1 Schéma électrique d'une porte logique NAND CMOS à quatre transistors.

plus puissante et efficace énergiquement. Les derniers processeurs intègrent ainsi quelques dizaines de milliards de transistors.

S'il existe plusieurs types de transistors, cette étude se concentrera uniquement sur le transistor à effet de champs dit MOSFET, pour *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*. Ce type de transistor est très répandu sur les puces électroniques à faible et moyenne puissance. Il est composé de 4 éléments principaux représentés sur la Figure 1.2 :

1. La **source** et le **drain** : deux des trois bornes du transistor, ils servent de réservoir à porteurs de charge. Le type du dopage et donc des charges (électrons ou trous) définit le type du transistor (N ou P) ;
2. La **grille** métallique qui contrôle l'état passant ou bloqué du transistor selon la tension V_g appliquée (troisième borne du transistor) ;
3. Le **canal** du transistor qui relie la source au drain : permet le passage des porteurs de charges selon la tension de grille ;
4. L'**oxyde de grille** qui isole la grille du canal et permet le couplage capacitif.

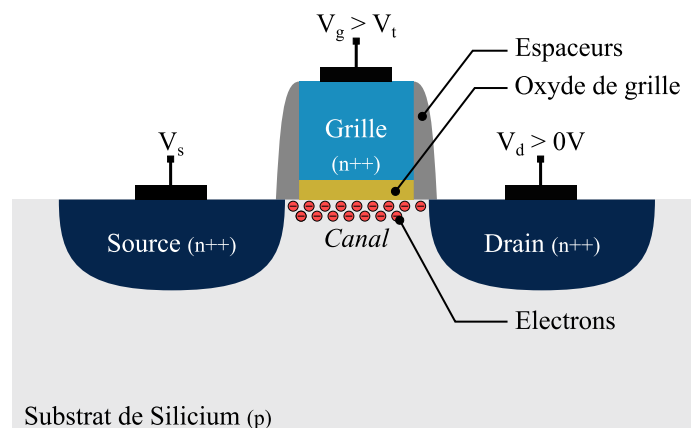


FIGURE 1.2 Représentation schématique simplifiée en coupe d'un transistor CMOS de type N.

Le principe de fonctionnement du transistor MOS repose sur la modulation de la densité de porteurs de charge dans le canal. Dans le cas d'un transistor de type N, lorsqu'une tension V_g est appliquée sur la grille, un champ électrique se forme et attire les électrons contenus dans le substrat vers la surface de l'oxyde de grille. Si le potentiel sur la grille est supérieur à la tension de seuil V_t , l'accumulation des électrons forme une couche conductrice reliant le drain à la source : on parle alors de couche d'inversion. Dans cette configuration, le courant entre la source et le drain peut passer lorsqu'une tension $V_d - V_s$ est appliquée aux bornes du transistor. Le transistor de type P a généralement un fonctionnement inverse et ne laisse

passer le courant que lorsque le potentiel de sa grille est nul. La technologie CMOS, pour *Complementary Metal Oxide Semiconductor*, utilise des associations de transistors de type N et P pour concevoir les portes logiques telle que celle représentée Figure 1.1.

Pour former une puce fonctionnelle, les transistors sont fabriqués sur un même substrat puis sont reliés entre eux selon le schéma électronique via des interconnexions placées au-dessus. La Figure 1.3a schématise la disposition, dite *layout*, d'une porte logique NAND correspondant au schéma électronique de la Figure 1.1. Le *layout* est composé de plusieurs niveaux, communément appelés *layers*, qui seront fabriqués successivement (cf. 1.1.2). Pour faire écho au schéma de la Figure 1.2, les implants N et P correspondent aux zones actives du produit, et auront le rôle de source ou de drain selon leur position dans le circuit. Les grilles des transistors en bleu sont placées de façon à former naturellement le circuit souhaité en évitant toute courbure. Finalement une ligne de métal est nécessaire pour les entrées et sorties de la fonction logique, elle est reliée aux zones actives via des contacts.

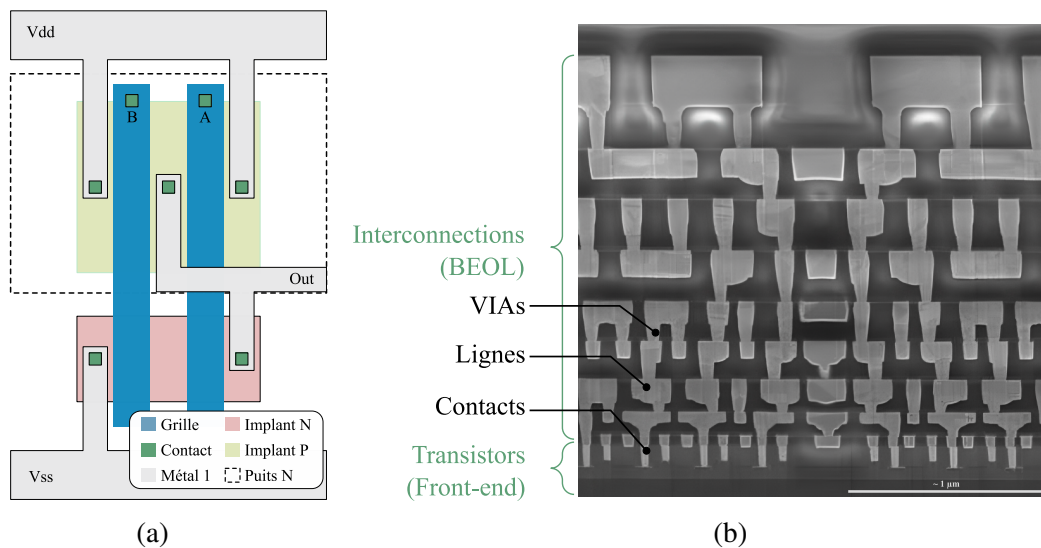


FIGURE 1.3 (a) Disposition (*layout*) d'une porte logique NAND correspondant au schéma Figure 1.1. (b) Image de Microscope Électronique à Transmission illustrant les multiples niveaux d'interconnexion reliant les transistors pour former des circuits aux fonctions complexes.

Le nombre de couches métalliques (interconnexions) peut atteindre la dizaine. La Figure 1.3b présente une image de TEM (Microscope Électronique à Transmission) d'une puce fabriquée à STMicroelectronics composée de 8 niveaux de métal. Chaque niveau métal correspond à un couple plot / ligne où le plot permet de relier deux lignes de niveau métal différents en limitant l'interaction électrostatique entre celles-ci. Le plot est plus communément appelé VIA, pour *Vertical Interconnection Access*. L'échelle de 1 μm est approximative afin

d'aider le lecteur à apprécier les dimensions mais ne représente pas les dimensions précises du composant. Les 8 niveaux d'interconnexions métalliques sont généralement désignés comme le BEOL (Back-End Of Line), tandis que les niveaux en-dessous du niveau contact font partie du FEOL (Front-End Of Line).

La miniaturisation agressive de ces dispositifs a nécessité de nombreuses améliorations de l'architecture de ces transistors. Depuis la publication originale de la loi de Moore en 1965 [2] prédisant la tendance d'un doublement du nombre de transistor par puce tous les 18 mois, les industriels se sont efforcés de suivre cette tendance. C'est ainsi qu'en 1974 Robert Dennard réarrange les formulations des caractéristiques physiques des transistors afin d'y inclure un facteur d'échelle [10]. L'industrie rentrera alors dans l'ère du *Dennard's scaling* qui consiste à réduire de 30% les dimensions physiques des transistors afin de réduire l'aire totale de 50% et donc permettre le doublement de la densité de transistor. Dès la fin des années 90, réduire les dimensions ne suffit plus à cause de limites physiques intrinsèques à l'architecture et aux matériaux utilisés. En 1998 une feuille de route internationale est réalisée par l'International Technology Roadmap For Semiconductor (ITRS) dans le but de coordonner la recherche internationale. En 1999, l'aluminium des niveaux métalliques a été remplacé par le cuivre pour réduire la résistance des interconnexions, puis le silicium du canal a été contraint physiquement en 2003 pour améliorer la mobilité des trous. De nouvelles grilles dites *High-K/Metal-Gate* ont remplacé en 2007 les grilles en oxyde de silicium pour garantir une capacité constante et limiter l'effet tunnel. On parle alors de *equivalent scaling*, car la diminution des paramètres géométriques ne suffit plus à eux seuls [11].

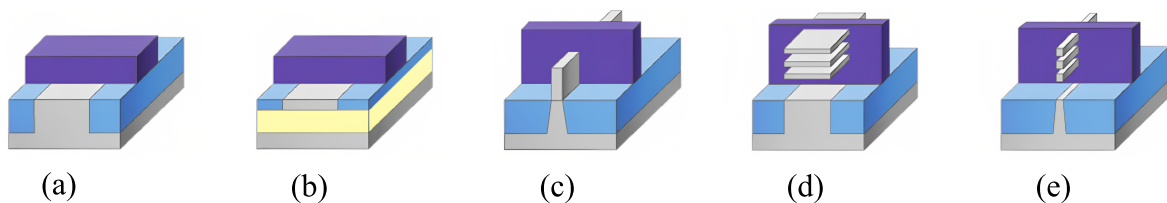


FIGURE 1.4 Évolution des architectures des transistors CMOS pour suivre la miniaturisation. Les trois premières technologies sont actuellement en production à fort volume : (a) Transistor *Bulk*, (b) Transistor sur substrat SOI (c) Transistors FinFET ou trigate, (d) Transistors GAA (Gate-All-Around) 1D, (e) Transistors GAA 2D. Adapté de [12, 13].

Finalement les effets de canal court apparaissent dès lors que la grille atteint quelques dizaines de nanomètres. Il faut alors mieux contrôler le canal. Pour cela deux nouvelles architectures ont été introduites dès 2011 : les transistors sur substrats SOI et les transistors FinFET. Les deux architectures sont représentées dans les Figures 1.4b et 1.4c. L'industrie déploie actuellement de nouvelles architectures 3D, telles que le Gate-All-Around (GAA) à base de nanotubes ou de nano-feuilles afin d'améliorer le contrôle de la grille et de permettre

une intégration 3D plus performante. Comme illustré sur les Figure 1.4d et Figure 1.4e, les dimensions horizontales des transistors ne sont plus réduites, on privilégie désormais une intégration verticale des transistors.

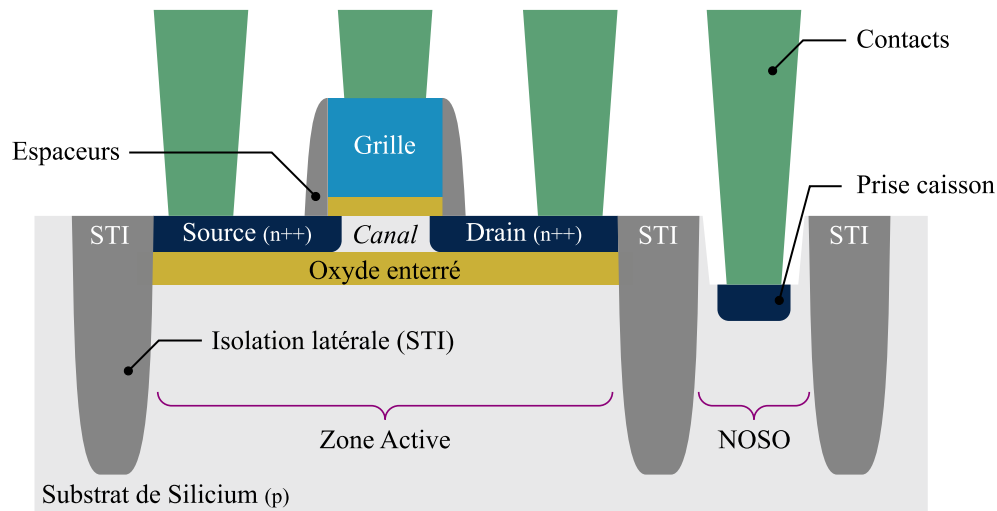


FIGURE 1.5 Représentation schématique simplifiée en coupe d'un transistor CMOS de type N sur substrat SOI, incluant les contacts.

Si les fondeurs spécialisés dans la logique et dans les mémoires utilisent généralement l'architecture FinFET du fait de sa plus simple miniaturisation et donc ses hautes performances, STMicroelectronics utilise l'architecture SOI développée par le CEA-Leti, IBM et SOITEC. STMicroelectronics est par ailleurs la première industrie à mettre en production la version totalement désertée du transistor CMOS sur isolant (FDSOI) représentée Figure 1.5. Le principe de fonctionnement est très similaire au transistor *bulk* illustré dans la Figure 1.2. Un oxyde enterré isole la partie active du substrat. Une tension peut alors être appliquée sur le substrat en parallèle de celle appliquée sur la grille afin d'optimiser le contrôle du canal. Cette tension est appliquée sur une prise caisson, dans une zone appelée NOSO (pour NO-SOI) où l'oxyde enterré a été retiré au préalable. Sur les technologies plus avancées, une épitaxie est réalisée afin de planariser la zone NOSO pour faciliter la fabrication des contacts. En plus du meilleur contrôle du canal, la technologie SOI offre de nombreux avantages supplémentaires grâce à l'utilisation de l'oxyde enterré et des tranchées isolantes (STI). Ces éléments forment une zone active isolée ce qui améliore l'efficacité énergétique du dispositif. En outre, cette isolation offre une meilleure résistance aux radiations, ce qui garantit une meilleure fiabilité des puces, en particulier pour les applications aérospatiales. Les substrats SOI sont également largement utilisés dans le marché des télécommunications, notamment dans les technologies 5G et Wi-Fi haute vitesse [14].

1.1.2 Procédé de fabrication

Le procédé de fabrication des puces commence par la croissance du substrat de silicium ultra pur. La croissance d'un lingot est généralement réalisé à l'aide du procédé de Czochralski. Pour cela, un cristal parfait de silicium est inséré dans un bain de silicium ultra pur (une impureté par milliards d'atomes autorisée) à environ 1500 °C, le tout dans un environnement contrôlé d'argon ou d'hélium à faible pression. Ce cristal est alors mis en rotation et est lentement retiré du bain afin de laisser croître le lingot autour du cristal. La croissance étant lente, de quelques mm/min seulement, le lingot obtenu est lui aussi mono-cristallin, de même orientation que le cristal d'origine. Long de 2 m et de diamètre allant jusqu'à 300 mm, le lingot est en général dopé P afin de mieux maîtriser la concentration d'impureté. Une fois le lingot obtenu, celui-ci est inspecté et poli en cylindre de faible rugosité et de diamètre souhaité. Enfin une encoche est réalisée pour indiquer le sens du cristal, puis le lingot mono-cristallin est découpé en plaque individuelles de quelques centaines de micromètres d'épaisseur à l'aide de scies à diamants. Ces plaques sont alors polies et nettoyées.

La fabrication de substrat silicium sur isolant, dit SOI, est réalisée à partir du procédé Smart Cut™ inventé et développé au CEA-Leti. Généralement les fonderies achètent ces substrats et démarrent leurs procédés à partir de cette étape. Dans les fonderies les plus avancées, des plaques de 300 mm sont utilisées et manipulées par des robots. La production est entièrement automatisée afin de gagner en débit de fabrication. L'utilisation de robots a aussi l'avantage de limiter les contaminations des plaques dues aux manipulations manuelles : les plaques sont rangées par lot de 25 dans des FOUP (Front Opening Universal Pod) où l'environnement est parfaitement contrôlé.

Les différents niveaux de la puce sont réalisés successivement. Pour un empilement comme celui représenté dans la Figure 1.5 les différentes couches sont généralement effectuées dans cet ordre : zones actives (STI) > puits N et P > zones NOSO > grilles > espaceurs > sources et drains > contacts > interconnexions. Avec la miniaturisation, ces couches se sont complexifiées et leur fabrication peut durer plusieurs mois. Les étapes nécessaires à la fabrication de chacune des couches sont relativement similaires, la Figure 1.6 les présente de manière simplifiée. On peut distinguer 6 étapes principales :

- (1) **La dépôt** : Une nouvelle couche de matériaux est déposée. Par exemple pour la grille et les espaceurs, du silicium et du nitrure sont respectivement déposés ;
- (2) **Le couchage de la résine** : La plaque de silicium est préparée puis une résine photosensible est déposée par enduction centrifuge. Cette étape comprend en général l'étalement au préalable de deux couches permettant d'améliorer l'adhésion de la

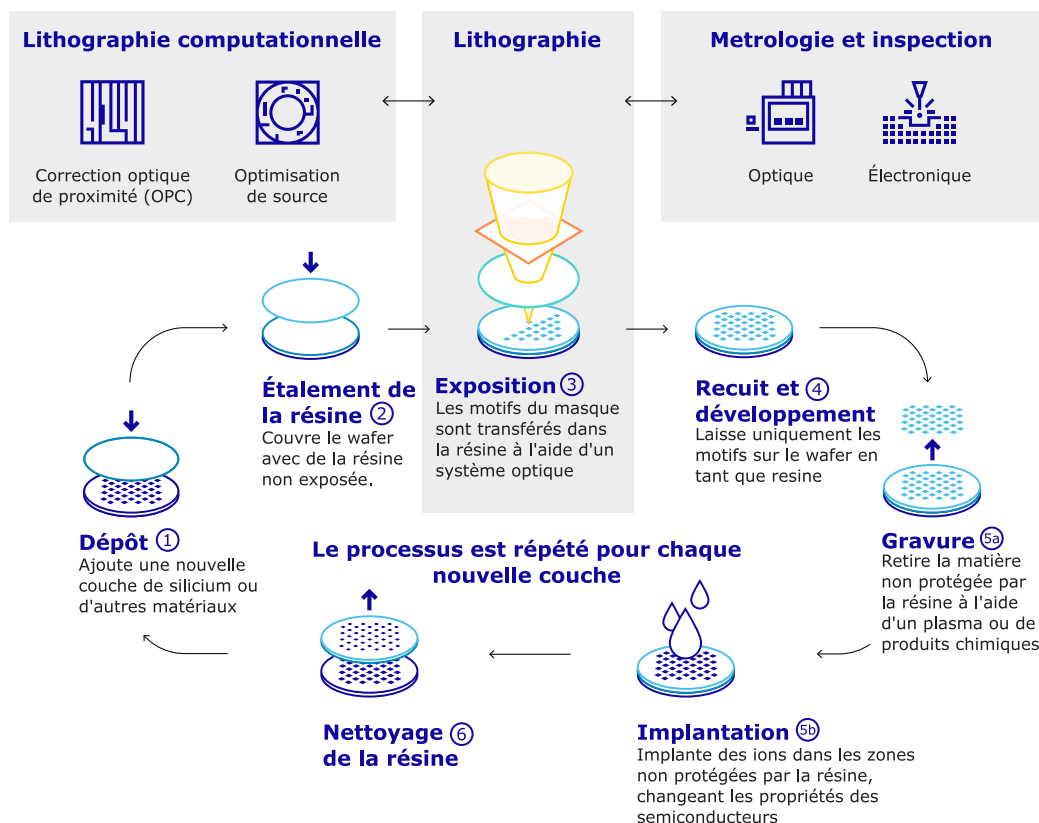


FIGURE 1.6 Principales étapes de fabrication de puces. Adapté de [15].

résine et d'éviter la réflexion des UV sur l'interface avec le substrat lors de l'étape de lithographie ;

- (3) **La lithographie** : Étape centrale du procédé, les motifs dessinés lors de la conception du produit (cf Figure 1.3a) sont transférés sur la résine photosensible par le biais de rayons ultraviolets. Pour cela, les motifs sont dessinés en chrome sur un masque en quartz grâce à des faisceaux d'électrons, un procédé très coûteux et long réalisé au préalable dans des *mask shops*. Le masque agit alors comme un pochoir et un système optique complexe répète ces motifs une centaine de fois sur l'ensemble de la plaque. Un masque peut contenir plusieurs puces, et une exposition sur la plaque forme un champ d'exposition. Les équipements les plus avancés de cette étape, les *scanners*, fonctionnent à des longueurs d'ondes dites DUV et EUV, de 193 nm et 13.5 nm respectivement ;
- (4) **Le recuit et le développement** : un recuit est réalisé après l'exposition aux UV pour activer les éléments chimiques de la résine dans les zones exposées. Ensuite, un développement à l'aide d'un solvant adapté permet de retirer les zones exposées.

Certaines résines ont un fonctionnement inverse, les zones exposées sont alors celles qui restent sur le substrat après le développement ;

- (5a) **La gravure** : Dans une chambre de gravure, un plasma ou un produit chimique vient retirer la couche déposée en (1) dans les zones non couvertes par la résine. Le transfert du motif sur le matériau désiré est alors terminé ;
- (5b) **L'implantation** : Généralement réalisée en début de processus, dans la partie FEOL, cette étape remplace alors la gravure et ne nécessite généralement pas de déposition. Des ions sont implantés avec une forte énergie dans les zones non protégées par la résine afin de changer les propriétés électriques du semi-conducteur. Cette étape sert notamment à définir les sources et drains, ainsi qu'à doper le poly-silicium de la grille ;
- (6) **Nettoyage de la résine** : Cette dernière étape permet de nettoyer la plaque des résidus des étapes précédentes afin de recommencer un nouveau cycle.

L'ensemble des étapes de (2) à (5a), et plus particulièrement les étapes de lithographie et gravure, sont généralement regroupées sous le terme de *patterning*. Ce terme sera utilisé dans la suite de ce manuscrit. L'enchaînement d'étapes présenté précédemment est une version simplifiée du procédé de fabrication de chaque étape, et varie selon la complexité des couches. Une étape de planarisation est notamment courante à la fois en FEOL et en BEOL. Nommée CMP (Chemical Mechanical Polishing), elle intervient si nécessaire après le dépôt d'une nouvelle couche sur le substrat. Dans l'architecture SOI représentée dans la Figure 1.5, deux CMP sont typiquement effectuées pour assurer la planarité des lignes de BEOL : après la définition des STI et après le remplissage des contacts. De nombreuses étapes de métrologie et d'inspection sont aussi nécessaires pour assurer le bon rendement du procédé de fabrication. Même si la métrologie intervient à chaque étape du procédé, la Figure 1.6 relie en particulier la métrologie à la lithographie. La lithographie est une étape critique du procédé et a besoin d'un grand volume d'informations pour fonctionner. Grâce à des boucles de rétro-actions (détaillées dans la section 1.2), la lithographie est capable de mitiger les défauts de fabrication.

1.1.3 Innovations pour les nœuds avancés

L'encart "lithographie computationnelle" de la Figure 1.6 a volontairement été laissé de côté pour cette sous-section : la Correction Optique de Proximité (OPC) et l'optimisation de source font partie de l'ensemble des solutions utilisées pour améliorer la résolution des équipements de lithographie à longueur d'onde d'exposition constante. De nombreuses

technologies ont été développées pour atteindre les nœuds les plus avancés. Deux d'entre-elles ont un impact sur les travaux de la thèse : l'OPC et le *multi-patterning*.

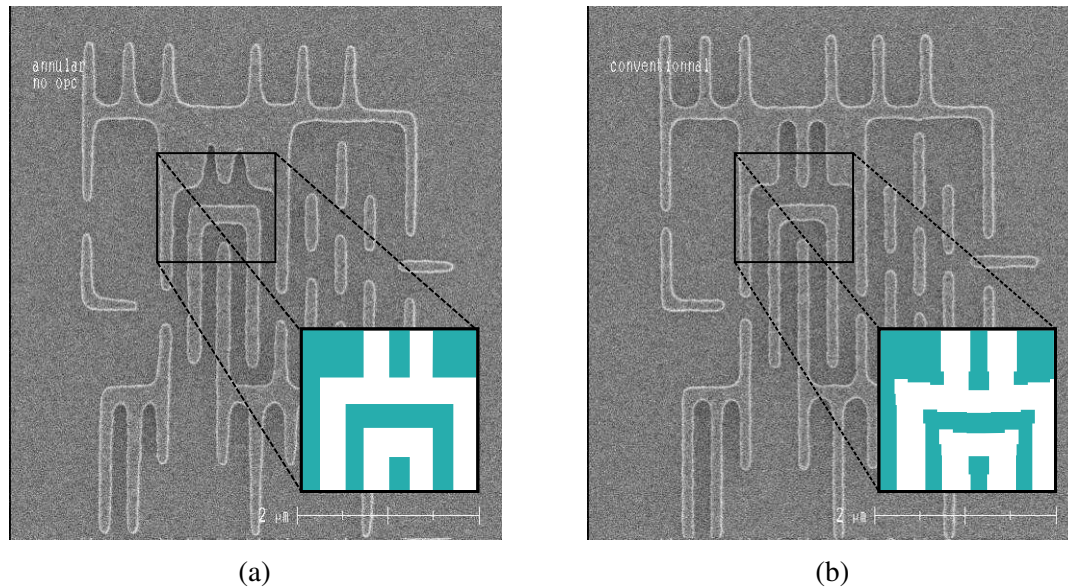


FIGURE 1.7 (a) Lorsque les motifs sont de dimensions proches ou inférieures à la longueur d'onde utilisée par la lithographie, des effets de proximité optiques détériorent la qualité des motifs transmis à la résine. (b) L'OPC, pour *Correction Optique de Proximité*, consiste à déformer volontairement les motifs pour anticiper ces effets optiques afin de transférer le motif souhaité.

L'OPC permet de compenser les distorsions dues à la diffraction de la lumière UV sur le masque pendant l'étape de lithographie. Les longueurs d'ondes d'exposition (193 nm et 248 nm) sont du même ordre de grandeur voire supérieures aux dimensions des motifs du masque, la lumière est donc diffractée, le motif transmis à la résine sur la plaque est déformé et ne correspond pas au besoin. Le rôle de l'OPC est de modifier en amont le motif sur le masque afin d'anticiper les déviations indésirables. Par exemple les motifs ont tendance à s'arrondir ; pour obtenir des angles relativement droits l'OPC vient alors rajouter de la matière sur l'extérieur et en enlever sur l'intérieur du coude. Le résultat Figure 1.7 démontre une nette amélioration du rendu. En supplément du masque avec les corrections optiques, l'équipe Resolution Enhancement Team (RET) en charge de cette étape génère en parallèle une simulation des motifs obtenus dans la résine. Cet élément sera essentiel pour les travaux de la thèse lors de la mesure sur le produit.

Le *multi-patterning* permet de réduire le pas (*pitch*) entre deux motifs et d'améliorer la qualité de leur transfert sur la résine. Dès le *pitch* 160 nm, la technique du *line cutting* est utilisée pour les grilles [16]. Les grilles sont alors transférées sur la résine en deux lithographies : la première dessinant de longues lignes horizontales (ou verticales), suivie

d'une seconde lithographie venant couper verticalement (ou horizontalement) les lignes en grilles individuelles. Dans le cas du niveau grille, on nomme Grille la première lithographie et Cut la seconde. Il est à noter que pour des raisons d'intégration l'ordre de ces deux lithographies peut être inversé. Une seconde technologie de réduction de *pitch* est utilisée dans le cadre de ces travaux : la division de *pitch*. Si l'on souhaite un *pitch* de 75 nm, il est par exemple possible de le réaliser à l'aide de deux lithographies de *pitch* 150 nm distancées de 75 nm. Cette méthode est la plus simple des méthodes de réduction de *pitch*, mais nécessite cependant un très bon contrôle de l'overlay et n'est suffisante que pour les nœuds 20 nm et 14 nm. Pour ces deux techniques l'intégration est similaire : nommée *LELE* pour *Lithography-Etch-Lithography-Etch*, elle consiste à un enchaînement de deux couples de lithographie/gravure afin de dessiner sur un masque dur (*hardmask*) le motif désiré. Une fois les motifs imprimés sur ce masque dur, une dernière gravure vient transférer le tout sur le matériau déposé en amont. Des technologies plus avancées tel que le double ou quadruple *patterning* auto-aligné sont utilisées pour les nœuds suivants [17].

L'essentiel

A l'issue de cette section, le lecteur possède tous les **pré-requis sur les procédés de fabrication** de circuits intégrés nécessaires à la compréhension de la suite du manuscrit. Les prochains chapitres se référeront à plusieurs reprises à des concepts abordés dans cette première partie. Un lexique disponible en fin de manuscrit aidera le lecteur à retrouver l'information.

La Figure 1.6 illustre une métrologie et une inspection en étroite relation avec la lithographie. La prochaine section aura pour objectif d'explicitier cette relation, notamment au travers de la notion de métrologie dédiée à la lithographie ainsi qu'à la métrologie en ligne. Celle-ci est nécessaire pour le contrôle de la qualité des puces afin d'assurer un bon rendement et une bonne fiabilité. Cette Section se fermera sur la mesure de l'overlay en ligne et en particulier de sa mesure par SEM.

1.2 Plan de contrôle en micro-électronique

Pour assurer le rendement de fonderie et la fiabilité des puces manufacturées, il est crucial d'avoir un plan de contrôle précis et rigoureux. D'une part le coût très élevé des équipements de fabrication et des infrastructures impose un rendement élevé pour assurer la rentabilité. D'autre part, les clients de STMicroelectronics demandent une très haute fiabilité des puces vendues. En visant les marchés automobiles et spatiaux, les puces doivent suivre la norme

AEC-Q100. Cette norme certifie notamment le fonctionnement de la puce à des températures jusqu'à 165 °C [18]. Ces spécifications sur le produit final se traduisent directement par des spécifications sur la fabrication de la puce : les variations de dimensions, de forme ou encore de surface de contact sont susceptibles de mener à une défaillance lors de la vie du produit. La maîtrise du rendement et de la fiabilité passe par deux stratégies complémentaires : des règles de dessins pour la conception et un suivi en ligne rigoureux pendant la fabrication.

1.2.1 Règles de dessin et métriques de suivi

Lorsque la conception informatique d'une puce est terminée, de nombreux tests de vérification physique sont réalisés. Parmi eux, le DRC (Design Rule Checking) consiste à vérifier que le *layout* de la puce est conforme aux règles de dessins. Ces règles, établies conjointement par les équipes de procédé et de conception, définissent les dimensions minimales des motifs unitaires ainsi que les distances les séparant. Elles sont garantes des performances et de la fiabilité de la puce réalisée. Par exemple, des lignes d'interconnexions réalisées en *multi-patterning* avec un mauvais alignement résulteraient en des lignes trop proches. Cela impliquerait une résistance plus élevée sur certaines interconnexions et une désynchronisation entre les différents signaux. De même, le bord d'un contact peut être trop proche d'une grille car son diamètre est supérieur à la norme ou car il est mal aligné, ce qui provoque un risque de court-circuit ou de claquage si la tension est élevée.

Soit d_{DR}^{A-B} la distance minimale imposée par les règles de dessin entre le niveau A et le niveau B . On peut alors le décomposer en deux termes :

$$d_{DR}^{A-B} = d_{elec}^{A-B} + d_{procede}^{A-B} \quad (1.1)$$

Où d_{elec}^{A-B} correspond à la distance minimale pour garantir les propriétés électriques selon les concepteurs. À cela s'ajoute une composante prenant en compte les variabilités du procédé de fabrication $d_{procede}^{A-B}$. L'objectif de cette partie sera d'explicitier ce dernier terme en fonction de grandeurs physiques mesurables. Pour suivre le procédé, en particulier l'étape de lithographie, deux principales métriques ont été historiquement définies :

CD (Dimension critique) : Initialement utilisé pour désigner le diamètre d'un VIA ou d'un contact, la largeur d'une grille ou d'une ligne. Par abus de langage ce terme est régulièrement utilisé pour décrire toute longueur d'intérêt.

OVL (Overlay) : De l'anglais *Overlay Control* signifiant "contrôle de la superposition". Ce vecteur correspond à la mesure de l'erreur d'alignement entre deux couches réalisées par lithographie. Il est défini comme la différence O entre le vecteur position P_1 du motif sur le niveau inférieur et le vecteur position P_2 du motif sur le niveau

supérieur : $O = P_1 - P_2$ [19]. L'overlay a une dimension globale et concerne les alignements à l'échelle de la plaque, du champ d'exposition ou encore de la puce.

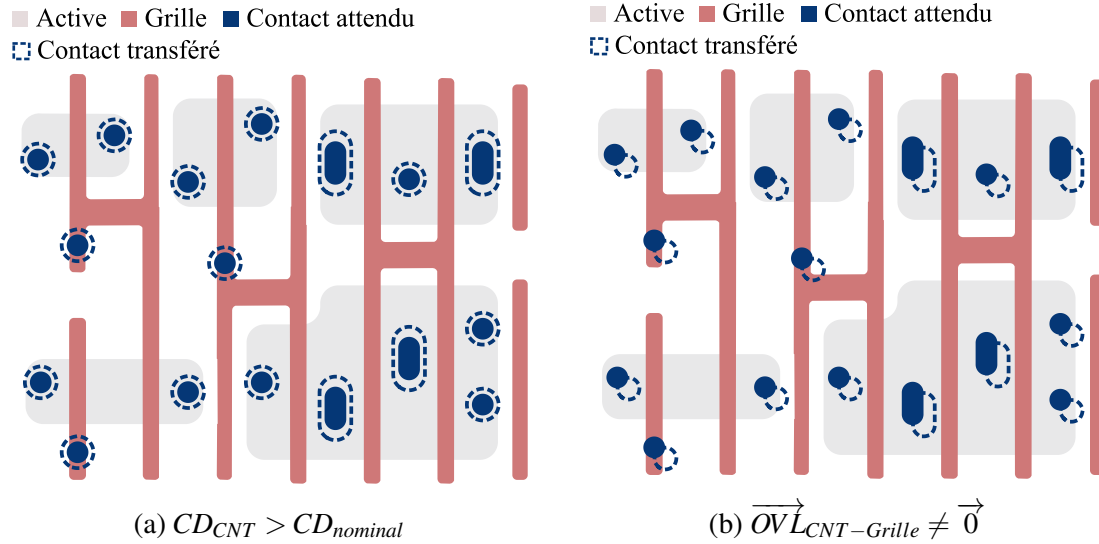


FIGURE 1.8 (a) Le CD des contacts CD_{CNT} est supérieur au CD nominal $CD_{nominal}$, leur diamètre est trop grand. (b) La couche de contact a été mal alignée à la couche des grilles. Ces deux phénomènes, *a priori* indépendants rapprochent le bord des contacts aux grilles risquant un court circuit.

La Figure 1.8 illustre ces deux grandeurs pour le niveau contact et grille. La Figure 1.8a représente une zone de la puce où le CD des contacts CD_{CNT} est trop élevé par rapport à la valeur nominale $CD_{nominal}$ tandis que la Figure 1.8b illustre un cas où l'alignement du niveau contact sur grille n'est pas bon, les contacts sont alors tous décalés. Ces deux phénomènes *a priori* indépendants rapprochent le bord des contacts aux grilles. Si leurs amplitudes sont trop élevées, ils peuvent provoquer un court circuit entre le drain ou la source d'un transistor et sa grille lors de la fabrication ou plus tard dans la vie du produit, on parle alors de *Time-dependent Dielectric Breakdown* (TDDB) [20]. Ces deux grandeurs sont globales, avec une fréquence spatiale de mesure de l'ordre du millimètre. La mesure du CD est généralement moyennée sur une centaine de motifs, tandis que la métrologie OVL intègre le désalignement sur une surface de quelques dizaines de micromètres carrés. La marge à prendre sur la distance entre deux motifs des niveaux A et B pour prendre en compte ces deux phénomènes globaux est alors calculée comme la somme de leurs contributions respectives au travers de l'équation 1.2.

$$d_{globale} = \sqrt{\frac{3\sigma_{CD}^A}{2} + \frac{3\sigma_{CD}^B}{2} + 3\sigma_{OVL}^{B-A}} \quad (1.2)$$

Où $\sigma_{CD}^{A,B}$ correspond à l'écart-type de la distribution des CD du niveau A, respectivement B, et σ_{OVL}^{B-A} à l'écart-type de la distribution de l'overlay entre les deux niveaux.

Ces mesures cachent cependant les variations locales, qui peuvent avoir une amplitude similaire voire supérieure à celle perçue sur les mesures globales [21]. De nouvelles métriques, illustrées Figure 1.9 peuvent être définies pour quantifier de manière statistique ces variations locales. Elles sont généralement exprimées comme 3 fois l'écart-type (3σ), signifiant que 99.7% des valeurs tomberont dans l'intervalle de largeur $2 \times 3\sigma$ autour de la valeur moyenne dans l'hypothèse d'une distribution gaussienne. Ces métriques sont complexes à mesurer et varient selon les motifs d'un même niveau. Pour les prendre en compte de manière simplifiée, un terme positif supérieur à 1 est rajouté devant $d_{globale}$ afin d'ajouter une certaine marge de sécurité. Cette valeur, notée ε , est déterminée en amont puis vérifiée lors des étapes de maturation de la technologie. Une amélioration de la caractérisation de ces effets locaux permettrait de retirer ce terme ε et de rajouter leur contribution directement au sein du terme $d_{globale}$. La Figure 1.10 montre un cas concret d'overlay local qui n'est pas pris en compte dans les mesures d'overlay globales [22].

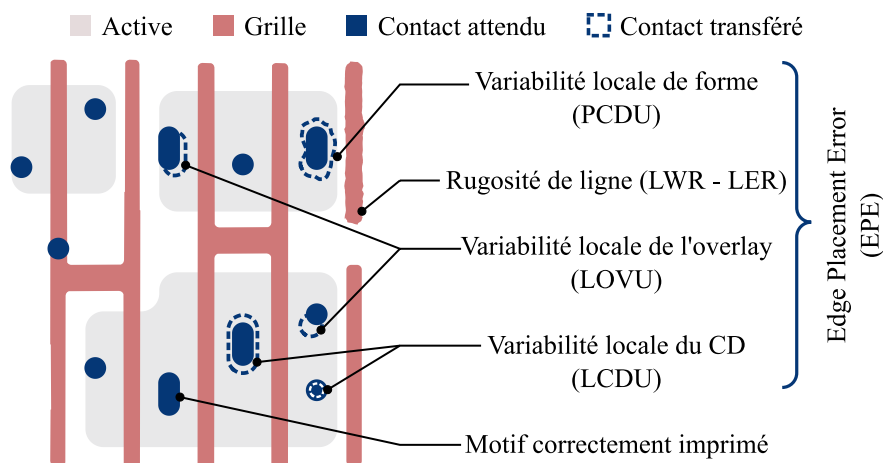


FIGURE 1.9 Définition des métriques quantifiant les variations locales.

LWR (Line Width Roughness) : Quantifie la rugosité d'une ligne. Cette grandeur est en général calculée comme 3 fois l'écart-type du CD sur le long de la ligne. La métrique LER (Line Edge Roughness) est très similaire, mais étudie uniquement un bord de la ligne.

LCDU (Local CD Uniformity) : Quantifie la variabilité locale du CD de VIAs et de contacts comme le 3σ des CD mesurés localement. Généralement mesuré par SEM, cela correspond au 3σ du CD d'une centaine de motifs (i.e de leurs diamètres moyens).

PCDU (Pattern CD Uniformity) : Adaptation de la métrique du LWR pour les formes 2D quelconques. Cette métrique est définie comme le 3σ de la différence de longueur entre les jauges obtenues à partir du contour du motif réel et celles obtenues à partir d'un contour de référence du même motif, agrégées par motif. Métrique proposée notamment par E. Soltani dans son manuscrit de thèse [20, 23].

LOVU (Local OVL Uniformity) : Similaire au LCDU pour l'overlay, cette métrique représente sa variabilité locale en tant que 3σ des valeurs localement mesurées, motif à motif.

EPE (Edge Placement Error) : Cette métrique peut être vue comme la résultante des métriques précédentes. Elle quantifie l'erreur de placement d'un bord d'un motif par rapport à son positionnement désiré.

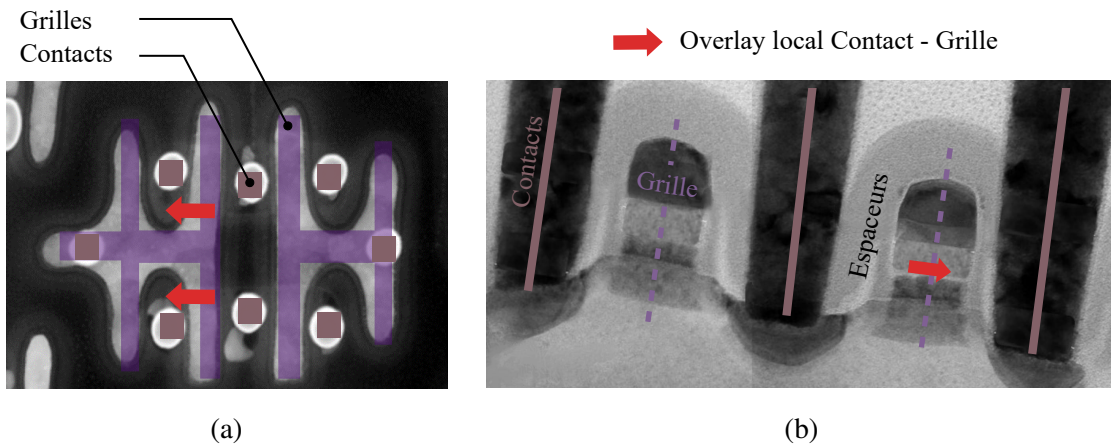


FIGURE 1.10 Illustration des variations locales de l'overlay non perçues par les mesures globales dans le cadre d'un déplacement de grilles systématique. (a) Mesure TEM vue du dessus avec le *Layout* superposé (b) Coupe TEM montrant un décalage local de la grille d'une dizaine de nanomètres. Adapté de [22].

Les motifs transférés sur la plaque subissent aussi des déformations lors d'autres étapes que la lithographie. Les étapes de gravure, de CMP et de recuit ont notamment des effets connus sur le CD et sur l'OVL [24]. Les recuits et CMP ont un effet non uniforme sur l'ensemble de la plaque et sont inclus dans la distribution finale des CD et OVL, leur effet est donc déjà pris en compte dans le terme $d_{globale}$ de l'équation 1.2. La gravure et la CMP (de manière moins significative) ajoutent un biais uniforme au premier ordre sur la plaque qui n'est pas pris en compte dans l'écart-type σ_{CD} . Il faut pour cela rajouter un terme à la règle de dessin :

$$d_{biais} = \frac{\Delta_{CD}^A}{2} + \frac{\Delta_{CD}^B}{2} \quad (1.3)$$

Où $\Delta_{CD}^{A,B}$ correspond aux biais uniformes générés sur le CD du niveau A, respectivement B, par les différents procédés autres que la lithographie.

Finalement, en sommant les contributions, la distance minimale imposée par les règles de dessin entre le niveau A et le niveau B (d_{DR}^{A-B}) peut s'écrire selon l'équation 1.4. Les termes de "biais uniformes" et de "variabilité locale" sont nommés hypothèses de procédé PA, de l'anglais *Process Assumptions*.

$$d_{DR}^{A-B} = \overbrace{d_{elec}^{A-B}}^{\text{Conception}} + \underbrace{\frac{\Delta_{CD}^A}{2} + \frac{\Delta_{CD}^B}{2}}_{\text{Biais uniformes}} + \underbrace{\varepsilon}_{\text{Coefficient de sécurité}} \underbrace{\sqrt{\frac{3\sigma_{CD}^A{}^2}{2} + \frac{3\sigma_{CD}^B{}^2}{2} + 3\sigma_{OVL}^2}}_{\text{Variabilité globale}} \quad (1.4)$$

1.2.2 Métrologie en ligne

Comme énoncé plus haut, les règles de dessin sont définies pour concevoir des puces avec la fiabilité et les performances souhaitées. Or, ces règles dépendent de la distribution des dimensions et du positionnement des motifs fabriqués. Il faut donc s'assurer que les valeurs renseignées pour le calcul des règles de dessins soient bien respectées sur la plaque. Cela passe par la définition de spécifications sur le procédé et par le suivi en ligne des différentes métriques.

L'industrie de la micro-électronique fonctionne sur un principe de fort volume pour minimiser les coûts. On parle de HVM de l'anglais *High Volume Manufacturing*.

À chaque étape du procédé de fabrication, une ou plusieurs étapes de métrologie sont nécessaires. Le très fort volume de production impose un échantillonnage des mesures : mesurer chaque puce de chaque plaque ne serait pas soutenable. Cet algorithme, défini par des statisticiens, permet d'assurer un suivi en ligne des métriques nécessaires tout en garantissant le respect des spécifications. Cet échantillonnage est illustré dans la Figure 1.12 : tous les lots ne sont donc pas mesurés, et pour chaque lot 2 ou 4 plaques sont généralement inspectées. Ensuite, un second échantillonnage spatial a lieu sur la plaque et une vingtaine de champs sont inspectés. Leur configuration spatiale est calculée pour optimiser l'uniformité de la mesure et leur nombre et position varient selon la mesure, le niveau et la technologie. Finalement, la mesure en ligne est effectuée sur une ou plusieurs mires dédiées qui sont localisées dans les lignes de découpe des puces et du champ. Des espaces dédiés à la métrologie peuvent

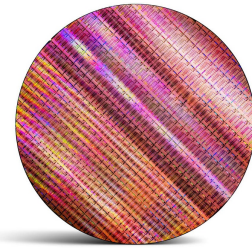


FIGURE 1.11 Plaque de silicium 300mm en fin de procédé. Source : Intel

aussi être réservés dans le produit pour permettre des mesures dites *in-device*. On parle alors d'EMET, de l'anglais *EMbedded METrology*.

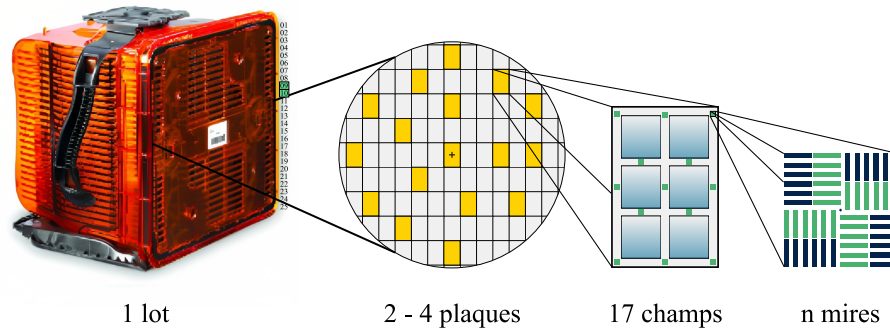


FIGURE 1.12 Le grand volume de plaques fabriquées impose un échantillonnage des mesures. De manière générale, entre 2 et 4 plaques sont mesurées par lot. Sur chacune de ces plaques, 17 champs sont sélectionnés, et les mesures y sont faites sur les n mires dédiées. Le nombre de mires utilisé dépend de la mesure, du niveau et du nœud technologique.

Chaque étape de procédé est optimisée à partir des données renvoyées par la métrologie, la performance des équipements doit donc être contrôlée précautionneusement. L'organisation SEMI a par ailleurs établi un vocabulaire précis des caractéristiques d'un outil de mesure [25] :

- Répétabilité** : Étroitesse de l'accord entre les résultats des mesures successives du même objet dans les mêmes conditions ;
- Reproductibilité** : Étroitesse de l'accord entre les résultats des mesures du même objet en faisant varier les conditions de mesure ;
- Aptitude (Capabilité)** : Indicateur de mérite qui quantifie le rapport entre la tolérance et la reproductibilité d'un système de mesure ;
- Résolution** : La plus petite différence d'indication d'un système de mesure qui peut être perçue de manière significative ;
- Justesse** : Aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications exemptes d'erreurs systématiques ;
- Linéarité** : Stabilité de l'erreur de justesse sur la gamme d'utilisation de l'instrument de mesure.

Deux métriques additionnelles sont particulièrement utilisées pour caractériser les équipements de métrologie overlay :

- TIS (Tool Induced Shift)** : Erreur de la mesure d'overlay induite par l'équipement due à un mauvais alignement vertical de la colonne optique ou d'une asymétrie de la mire

de mesure. Cette métrique est calculée comme l'écart entre deux mesures successives après une rotation de 180° ;

Précision dynamique : Incertitude de la mesure comprenant à la fois les effets de répétabilité et de reproductibilité. Cette grandeur est évaluée comme étant 3 fois l'écart-type (3σ) de l'erreur de mesure sur l'ensemble des mesures.

TMU (Tool Measurement Uncertainty) : Incertitude de l'équipement de métrologie OVL pour un noeud technologique précis, entre deux niveaux donnés. Le TMU est défini par la moyenne quadratique du TIS, du TIS à 3σ , de la précision dynamique et du matching avec les autres équipements.

Ces différentes caractéristiques sont contrôlées à l'aide d'étalons certifiés à intervalles réguliers et lorsqu'une nouvelle mesure en ligne est mise en place. La stabilité et la concordance (*matching*) de la flotte d'équipements sont suivies dans le temps. Pour cela une architecture particulière a été mise en place dans les fonderies. Nommée APC de l'anglais *Advanced Process Control*, elle est représentée sur la Figure 1.13.

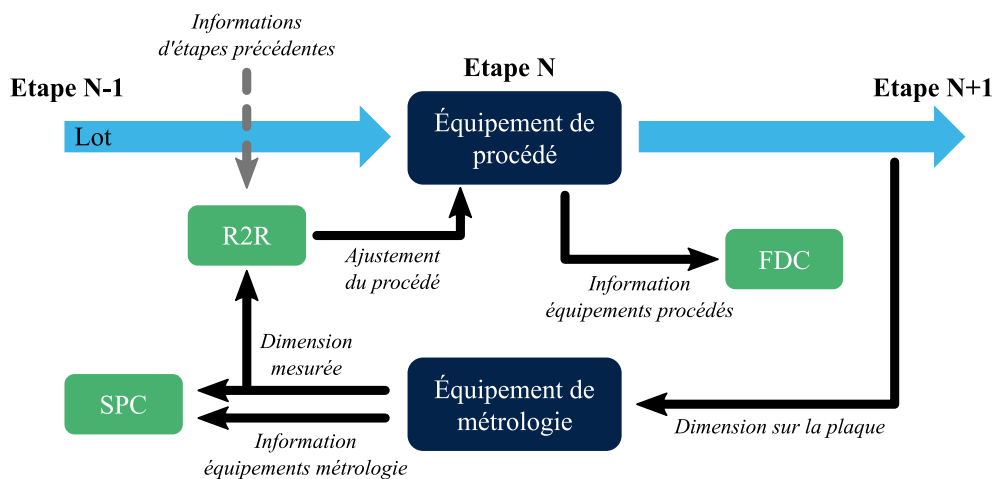


FIGURE 1.13 Pour assurer le suivi dans le temps des spécifications du produit et des équipements de mesure, une boucle de contrôle avancée du procédé de fabrication APC a été mise au point.

A chaque étape de fabrication, une ou plusieurs étapes de mesure vont s'assurer que le motif transféré est proche de celui désiré. Pour cela, les dimensions mesurées sont envoyées dans une boucle dite de *Run To Run* (R2R) qui va renvoyer une correction à l'équipement afin d'ajuster le procédé. Cette boucle peut aussi récupérer des informations d'autres étapes en amont. En parallèle, de nombreuses données liées à la mesure sont stockées afin de suivre les tendances pour un contrôle statistique au travers des *Statistical Process Control* (SPC).

De même, les variations du procédé à l'échelle de l'équipement de fabrication sont suivies au sein des *Fault Detection and Classification* (FDC) afin de pouvoir identifier l'origine des anomalies et des dérives détectées dans les SPC. Cette architecture APC est efficace pour les étapes de lithographie où le CD, l'overlay, la dose sont contrôlés et réajustés au sein de boucles de rétroaction et d'anticipation.

1.2.3 Cas particulier de l'overlay

À chaque étape de lithographie, la plaque est alignée dans le référentiel du scanner. La Figure 1.14 détaille le principe de l'alignement *Through The Lens* (TTL) [19, 26, 27].

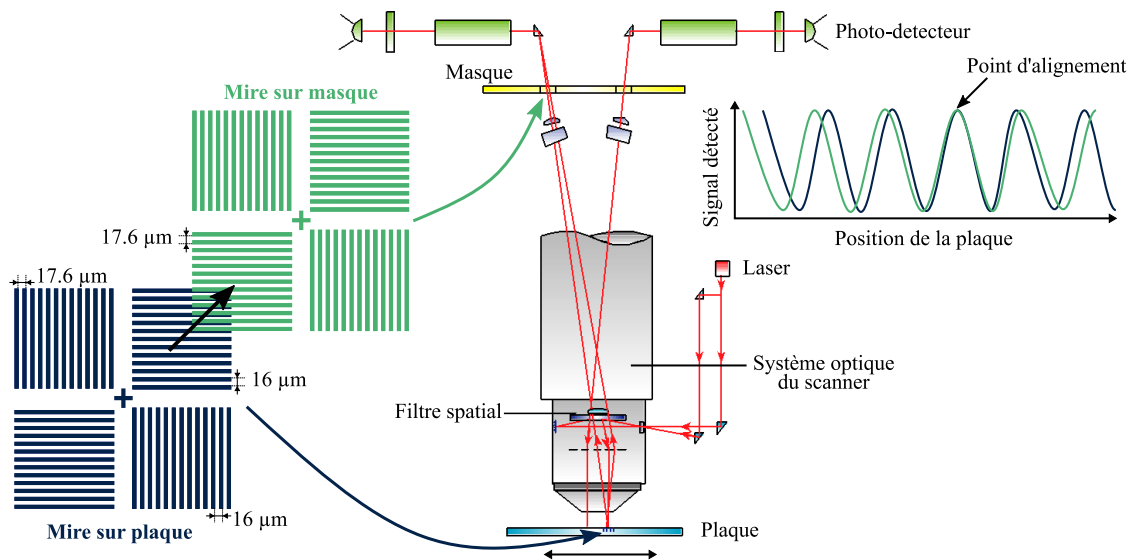


FIGURE 1.14 Schéma du principe de l'alignement scanner TTL. Adapté de [19, 26, 27].

Deux mires basées sur des réseaux de diffraction sont placées sur le masque et dans la plaque. Un laser HeNe ($\lambda=632.8$ nm) illumine la plaque au travers de la lentille optique du scanner. Le signal est diffracté sur la mire de la plaque et le premier ordre de diffraction est renvoyé sur la seconde mire d'alignement au niveau du masque. Le signal résultant est alors récupéré via un photo-détecteur. En déplaçant le support de la plaque le maximum d'intensité est trouvé : c'est la position d'alignement. L'utilisation de deux réseaux de pas différents (16 μm et 17.6 μm) permet d'obtenir des pics de maximum d'intensité séparés de plus grandes distances (88 μm) et donc de garantir la robustesse de l'alignement. L'alignement est généralement effectué sur une dizaine de points par plaque. Cette méthode d'alignement a évolué depuis sa proposition en 1985 [27], l'utilisation de plusieurs longueurs d'ondes et de plusieurs ordres de diffraction ont notamment amélioré sa robustesse à l'asymétrie des mires.

A l'issue de cette étape, la grille d'exposition du scanner est alignée sur le niveau précédent. Pour obtenir une superposition de l'ordre du nanomètre entre les motifs des deux niveaux, il est nécessaire de modifier la grille d'exposition afin de prendre en compte les variations à l'échelle de la plaque et du champ. C'est le rôle de la mesure de l'overlay.

L'overlay se différencie des autres métriques de par son caractère vectoriel. Une seconde particularité de l'overlay est sa dépendance spatiale : les mesures de points proches sur la plaque ne sont *a priori* pas indépendants et la variation de l'overlay sur la plaque est continue. Les mesures d'overlay sont généralement représentées sous la forme d'un champ vectoriel tel que sur la Figure 1.15. L'alignement parfait de deux niveaux implique un overlay nul, l'objectif de la boucle APC est donc de minimiser l'overlay. Les spécifications OVL ($USL_{x,y}$) sont en général établies comme une borne supérieure de la moyenne de l'overlay sur la plaque plus 3 fois son écart type σ :

$$0 \leq |\overline{OVL_{x,y}}| + 3\sigma(OVL_{x,y}) \leq USL_{x,y} \quad (1.5)$$

L'overlay entre deux niveaux résulte de nombreuses contributions et plusieurs étapes du procédé de fabrication ont une influence directe sur l'overlay présent sur le produit. P. Leray récapitule en 2017 les différentes sources de désalignement réels entre 2 niveaux [24]. La Figure 1.16 adaptée de ses travaux illustre les 8 principales causes. La formation d'un arc, de gauchissement et de dislocations sur la plaque est issue de procédés spécifiques tels que les recuits et certaines dépositions incluant des fortes contraintes de tension [28]. D'autre part, le déplacement de la plaque lors de son exposition génère une signature OVL intra-plaque tandis que les aberrations de la lentille et son échauffement produisent des signatures intra-champ [29]. Une erreur de registration entre deux masques d'un même niveau, c'est-à-dire une erreur d'alignement lors de la fabrication du masque, mène aussi à une erreur systématique sur la plaque [24, 30]. Des contraintes mécaniques locales peuvent aussi générer de l'overlay [22, 31] et la non-uniformité des effets de bords est connue pour poser des difficultés de contrôle [32]. Un dernier élément non illustré dans la Figure 1.16 est la correspondance entre deux scanners, le *matching*. Les scanners de lithographie présentent des imperfections propres à chaque scanner : non-planéité des miroirs et distorsions au sein des lentilles [19]. Ces imperfections génèrent des erreurs systématiques à l'échelle de la plaque et du champ. Celles-ci s'annulent lorsque le même scanner est utilisé pour tous les niveaux d'une plaque

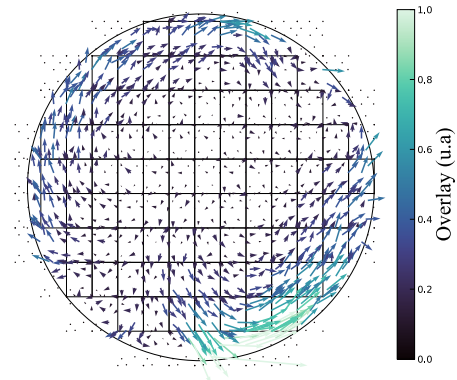


FIGURE 1.15 Cartographie OVL.

mais doivent être prises en compte lorsque plusieurs scanners sont utilisés. Une erreur de placement de lentille génère de l'overlay intra-champ et en particulier de l'EPE [19].

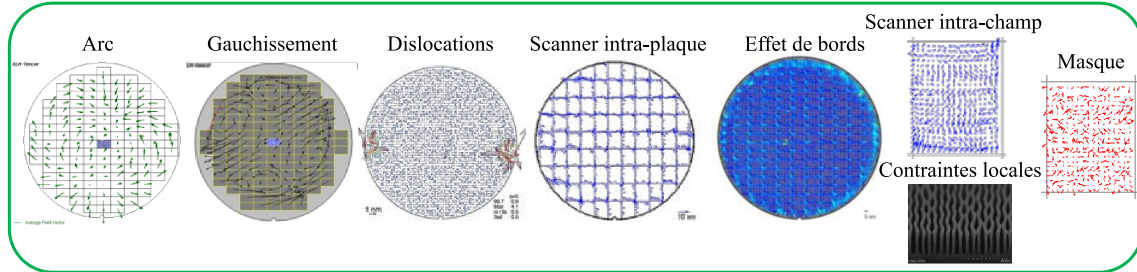


FIGURE 1.16 Comparaison de différentes signatures d'overlay et leur origine. Adapté de [24].

Modélisation de l'overlay

En modifiant les paramètres d'exposition il est possible de minimiser l'erreur d'overlay due à la lithographie à des valeurs inférieures à 2.5 nm tout en corrigeant l'effet d'autres étapes [33, 34]. Cette correction est permise par la modélisation de la signature OVL à l'échelle de la plaque et du champ d'exposition selon des paramètres corrigeables par le scanner. L'overlay est représenté comme l'alignement d'une grille transférée sur une grille du substrat, les deux étant idéalement orthogonales. Les erreurs d'overlay peuvent être réparties en deux catégories : l'overlay intra-plaque et intra-champ.

L'overlay intra-plaque est modélisé selon des termes linéaires dès 1979 par Perloff [35]. Soit (X_W, Y_W) les coordonnées du point de mesure dans les coordonnées de la plaque, l'origine étant placée en son centre par convention. Les composantes X et Y de l'erreur d'overlay intra-plaque $(\Delta X, \Delta Y)$ peuvent alors s'écrire sous la forme

$$\begin{cases} \Delta X = T_X + M_X X_W - R_X Y_W + e_X \\ \Delta Y = T_Y + M_Y Y_W + R_Y X_W + e_Y \end{cases} \quad (1.6)$$

Où e_X et e_Y correspondent aux erreurs résiduelles qui ne rentrent pas dans le modèle. Les termes linéaires de l'équation 1.6 quant à eux ont une signification physique précise. Les coefficients T_X et T_Y représentent l'erreur de translation dans la direction X et Y respectivement. Ils indiquent un décalage général à l'échelle de la plaque entre la grille transférée et celle imprimée sur le substrat. Les facteurs M_X et M_Y sont des erreurs de grandissement, couramment nommés erreur de *magnification* en anglais. Ils correspondent à une mauvaise compensation de l'expansion ou de la contraction du substrat. Les derniers paramètres R_X et R_Y modélisent la rotation de la grille transférée. Si $R_X = R_Y$, alors une rotation directe

(anti-horaire) est présente sur la plaque. Il est courant d'écrire ces deux paramètres comme la composition de deux composantes de rotation symétrique (R_S) et asymétrique (R_{AS}) définies par l'équation 1.7.

$$\begin{cases} R_S = \frac{R_X + R_Y}{2} \\ R_{AS} = \frac{R_X - R_Y}{2} \end{cases} \quad (1.7)$$

Les modèles intra-champ ont été introduits dès 1982 par MacMillan et Ryden [36]. Les scanners actuellement en production à STMicroelectronics sont capables de corriger des signature d'overlay d'ordre 3, avec des modèles ayant jusqu'à 15 paramètres par champ d'exposition. On parle alors de corrections iHOPC de l'anglais *intra-field High Order Process Control*. Soit (X_F, Y_F) les coordonnées du point de mesure dans les coordonnées du champ d'exposition, la composante intra-champ de l'overlay $(\delta X, \delta Y)$ peut alors s'écrire

$$\begin{cases} \delta X = k_1 + k_3 X_F + k_5 Y_F + k_7 X_F^2 + k_9 X_F Y_F + k_{11} Y_F^2 + k_{13} X_F^3 + k_{15} X_F^2 Y_F + k_{17} X_F Y_F^2 + k_{19} Y_F^3 + e_X \\ \delta Y = \underbrace{k_2 + k_4 Y_F + k_6 X_F}_{\text{Termes linéaires}} + \underbrace{k_8 Y_F^2 + k_{10} Y_F X_F + k_{12} X_F^2 + k_{14} Y_F^3 + k_{16} X_F Y_F^2 + k_{18} X_F^2 Y_F + k_{20} X_F^3}_{\text{Termes HOPC}} + \underbrace{e_Y}_{\text{Résiduels}} \end{cases} \quad (1.8)$$

où chaque terme k_i maintenu dans le modèle possède un sens physique corrigeable par le scanner. Les termes $k_9, k_{15}, k_{17}, k_{18}, k_{20}$ sont alors retirés du modèle, le réduisant à 15 paramètres. La Figure 1.17 illustre l'impact qu'a chaque coefficient k_i sur la grille du scanner. Il est intéressant de noter que les termes d'ordres supérieurs à 1 ne sont pas symétriques, cela impose l'introduction d'une correction de translation avec les termes k_1 et k_2 même lorsque ceux-ci sont déjà contenus dans les termes intra-plaque.

Le modèle intra-plaque linéaire est généralement combiné avec un modèle intra-champ pour améliorer la correction appliquée lors du Run To Run (R2R). Le modèle intra-champ peut alors contenir seulement une partie des 15 termes corrigeables. Un modèle fréquemment utilisé consiste à n'utiliser que les termes linéaires tant au niveau intra-plaque qu'intra-champ. Le modèle de correction linéaire peut alors s'écrire en sommant les composantes tel que $OV_{L_{X,Y}}(\mathbf{U}) = \Delta X, Y + \delta X, Y$ où $\mathbf{U} = (X_W, Y_W, X_F, Y_F)$ le vecteur coordonnées.

$$\begin{cases} OV_{L_X}(\mathbf{U}) = T_X + M_X X_W - R_X Y_W + k_3 X_F + k_5 Y_F + e_X(\mathbf{U}) \\ OV_{L_Y}(\mathbf{U}) = T_Y + M_Y Y_W + R_Y X_W + k_4 Y_F + k_6 X_F + e_Y(\mathbf{U}) \end{cases} \quad (1.9)$$

Les coefficients de l'équation 1.9 sont généralement ré-écrits pour faciliter leur analyse. Il est par exemple possible de séparer les composantes asymétriques et symétriques en

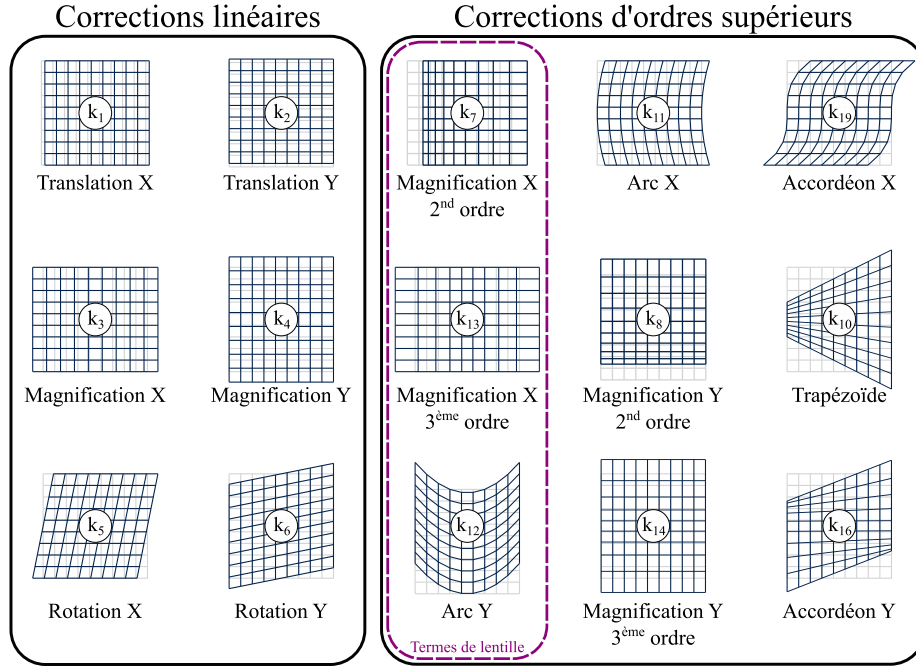


FIGURE 1.17 Modélisation de l'overlay.

définissant $WRot = R_Y$, $NOrtho = R_X - WRot$, $RMag = (k_3 + k_4)/2$, $ARMag = (k_3 - k_4)/2$, $RRot = -(k_5 + k_6)/2$, $ARRot = -(k_5 - k_6)/2$. L'équation 1.10 est alors obtenue et les coefficients sont alors représentés sous la forme d'un diagramme en barres tel que sur la Figure 1.18. L'unité varie selon les coefficients : $Trans_{X,Y}$ en nm, $Scale_{X,Y}$ en ppm et les termes de rotation en μ rad.

$$\left\{ \begin{array}{l} OVL_X(\mathbf{U}) = Trans_X + Scale_X \cdot X_W - (WRot + NOrtho)Y_W + \\ \quad (RMag + ARMag)X_F - (RRot + ARRot)Y_F + e_X(\mathbf{U}) \\ OVL_Y(\mathbf{U}) = Trans_Y + Scale_Y \cdot Y_W + WRot \cdot X_W + \\ \quad (RMag - ARMag)Y_F + (RRot - ARRot)X_F + e_Y(\mathbf{U}) \end{array} \right. \quad (1.10)$$

Les modèles de correction d'overlay sont généralement calculés par la méthode des moindres carrés appliquée sur le set de mesures sur la plaque. Le modèle intra-plaque est systématiquement réalisé en une fois sur l'ensemble des points de la plaque, contrairement au modèle intra-champ qui peut avoir un modèle par champ, on parle alors de Correction Par Exposition (CPE).

Deux conditions doivent être respectées pour obtenir un modèle fiable et représentatif de l'overlay présent sur la plaque. Premièrement, les mires de mesures doivent être en nombre

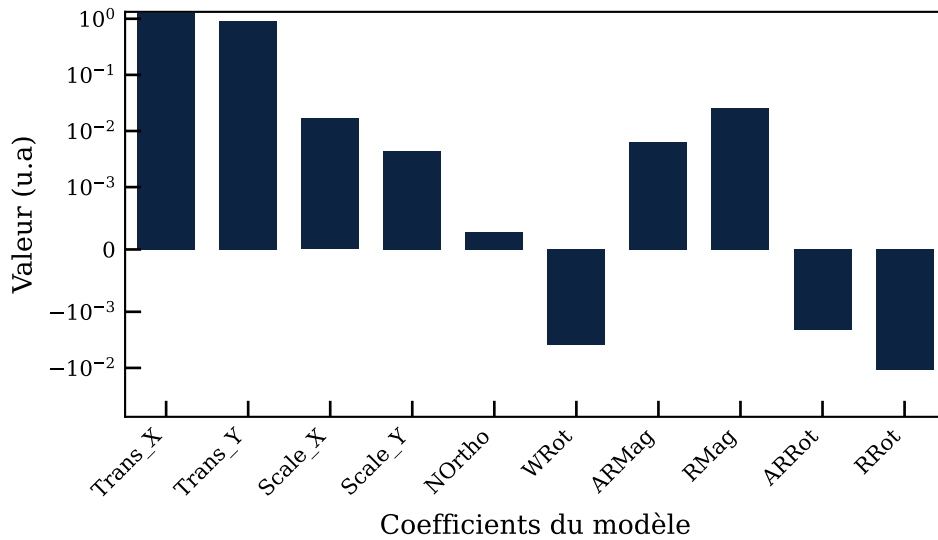


FIGURE 1.18 Coefficients d'un modèle overlay linéaire à 10 paramètres.

suffisant pour le modèle choisi et couvrir uniformément le champ et la plaque afin d'éviter un sur-apprentissage du modèle sur une zone précise. Une mauvaise disposition spatiale peut générer des artefacts d'overlay dans les zones non couvertes par la mesure et nuire au rendement. Deuxièmement, la mesure doit être effectuée sur des mires représentatives du produit : si l'overlay vu par la plaque est différent de celui vu par la mire, alors la correction sera biaisée. On distingue alors l'overlay sur le produit, dit *On-Product Overlay* (OPO), de l'overlay mesuré sur les mires. Le biais entre la mesure en ligne de l'OVL post-lithographie et l'OPO post-gravure est nommé *Non-Zero Offset* (NZO).

L'essentiel

Un **plan de contrôle** précis et rigoureux permet d'**assurer le rendement** de la production et la **fiabilité** des puces manufacturées. La section 1.2 a permis d'expliciter ce plan au travers de deux composantes complémentaires : les règles de dessin et la métrologie en ligne. Ces premières assurent une conception des puces qui soit réalisable en production et qui soit robuste aux variations de procédés. D'autre part **le CD et l'OVL sont régulés en ligne grâce à une boucle dite d'APC**. Cette boucle permet une rétroaction de la mesure sur la fabrication des plaques suivantes ou l'amélioration de la plaque actuelle si la métrique est hors des spécifications. De par son caractère vectoriel, l'overlay subit un traitement différent des autres métriques. Sur un scanner à immersion, la signature OVL par champ peut être modélisée par un polynôme d'ordre 3 ayant jusqu'à 15 paramètres correspondant à un paramètre réglable du scanner. Il est donc possible de **corriger la signature overlay** tant à l'échelle de la plaque que du champ.

Cette correction au sein de la boucle APC nécessite cependant **une mesure robuste, stable dans le temps et représentative du produit**. La modélisation nécessite une **homogénéité spatiale** des mesures tant à l'échelle de la plaque que du champ ainsi qu'un nombre de mires par champ adapté au modèle utilisé. Il faut pouvoir faire des mesures au sein d'un champ d'exposition en grand volume. Les solutions développées par les industriels seront exposées dans la section suivante. Deux grandes familles de mesure overlay existent : la métrologie optique et la métrologie par électron qui sera évaluée dans le cadre de cette thèse.

1.3 Métrologie overlay

L'overlay étant intégré dans la boucle APC, la mesure doit être robuste et stable pour permettre une correction lot à lot. Pour cela la mesure en ligne de l'overlay est communément réalisée sur des mires dédiées. Ces mires, de quatre à une vingtaine par champ, sont situées dans les lignes de découpe ou lorsque cela est possible dans les EMET. Historiquement la mesure est réalisée optiquement pour garantir un débit élevé, mais cette section montrera l'émergence d'une mesure par SEM motivée par un besoin de représentativité.

1.3.1 Mesure optique (Opt-OVL)

Deux technologies de mesure optique existent : la première est basée sur la prise d'une image au microscope optique (IBO de l'anglais *Image Based Overlay*) tandis que la seconde méthode est basée sur l'analyse d'un signal optique diffracté (DBO de l'anglais *Diffraction Based Overlay*).

IBO (Image Based Overlay)

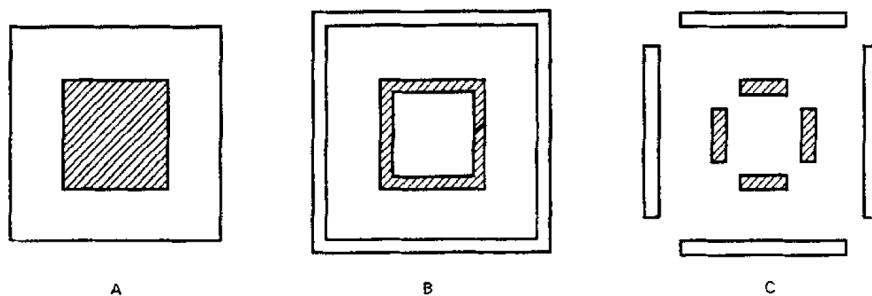


FIGURE 1.19 Mires d'overlay selon la nomenclature SEMI. (a) Box-in-Box (BiB) (b) Frame-in-Frame (FiF) (c) Bars-in-bars (BiB) [37].

L'IBO consiste en l'analyse d'une image prise au microscope optique d'une mire dédiée. La cible de mesure contient généralement deux motifs imbriqués de façon à ce que leur barycentre coïncident. Le motif extérieur correspond à la couche de référence et l'intérieur à celle à mesurer. La longueur d'onde de la prise d'image est généralement sélectionnée dans la gamme 400 nm - 900 nm. Le silicium étant relativement transparent aux longueurs d'ondes du visible, cette technique permet de visualiser correctement deux couches séparées de quelques centaines de nanomètres. Des longueurs d'onde infra-rouges peuvent aussi être utilisées lorsque l'épaisseur de l'empilement nécessite une transmission plus élevée, c'est notamment le cas pour l'intégration 3D où deux plaques de silicium sont collées ensemble ou pour les mémoires 3D [38]. A partir d'un algorithme de reconnaissance de la cible, la position des barycentres des deux motifs est détectée et l'overlay moyen sur toute la surface de la cible peut être déduit de leur différence. Cette métrologie par centre de gravité permet à l'IBO de ne pas voir sa résolution être limitée par la diffraction de Rayleigh. Afin d'uniformiser les mesures d'overlay, les premières mires ont été définies par l'association internationale de la microélectronique (SEMI) comme étant les « Box in Box (BiB) » [39]. Elles ont ensuite été améliorées en « Frame in Frame (FiF) » et en « Bars in Bars (BiB) » représentées dans la Figure 1.19 [37]. L'évolution des mires OVL suit une certaine tendance : d'une génération à l'autre la quantité totale de bords est augmentée et les motifs formant la mire sont adaptés

aux évolutions pour être similaires aux motifs de la puce. La première tendance permet l'amélioration la détection du barycentre et la mitigation de l'impact de la rugosité tandis que la seconde vise à minimiser l'OPO.

Dans la continuité, la mire AIM de l'anglais *Advanced Imaging Metrology* est proposée en 2004 par Adel *et al.* pour l'introduction des nœuds inférieurs à 100 nm [40]. Sa conception, représenté Figure 1.20a, est particulièrement motivée par la nécessité d'une meilleure représentativité de la puce. En effet, le processus de fabrication est de plus en plus optimisé pour des motifs de dimensions inférieures à celles des BiBs. L'ajout de l'OPC complique l'intégration des mires conventionnelles et l'utilisation de la CMP est connue pour générer des artefacts métrologiques [24].

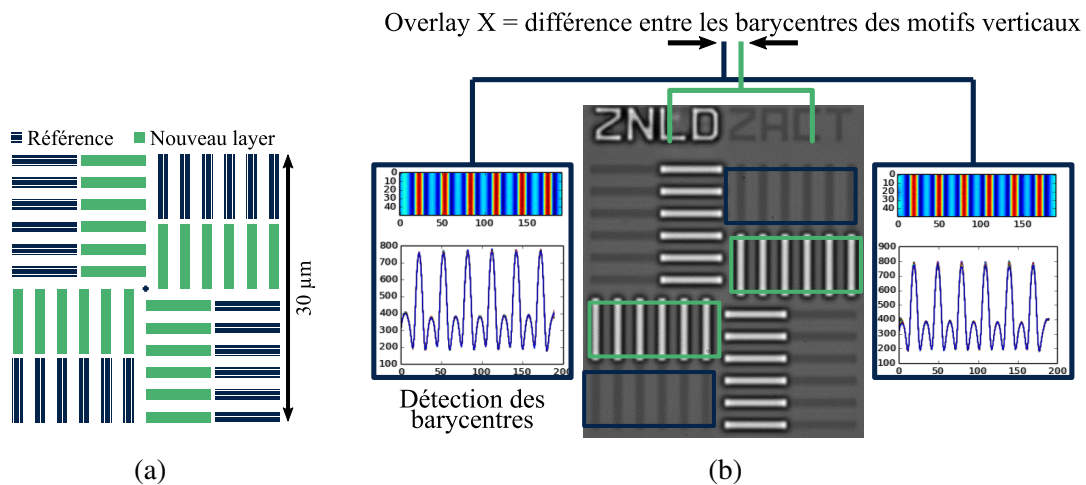


FIGURE 1.20 (a) Mire de mesure IBO dite AIM. (b) Le barycentre de chaque cadrant est obtenu grâce à la détection de la position des barres par analyse de l'image optique.

La nouvelle mire AIM se compose de 4 cadrants identiques à une rotation prêt. Chaque cadrant contient deux réseaux de six lignes d'environ $10 \times 1 \mu\text{m}^2$, positionnés l'un en face de l'autre. La Figure 1.20b illustre le principe de mesure : sur chaque cadrant, le niveau de gris de l'image permet de détecter précisément la position des lignes et donc leur barycentre. Deux cadrants sont dédiés à la mesure horizontale tandis que les deux autres à la mesure verticale. Les lignes des réseaux peuvent être segmentées en motifs de dimension inférieure à la longueur d'onde afin de respecter le *pitch* de la technologie CMOS utilisée sans pour autant changer l'analyse optique, tout en améliorant le contraste [41]. La multitude de lignes maximise la longueur totale de bords mesurée afin de réduire l'impact de la rugosité sur la mesure [42], de plus les effets de bords sont généralement évités en ne considérant que les quatre lignes internes au réseau. Enfin cette structure est chirale ce qui permet de différencier deux mires proches et donc facilite leur intégration [13].

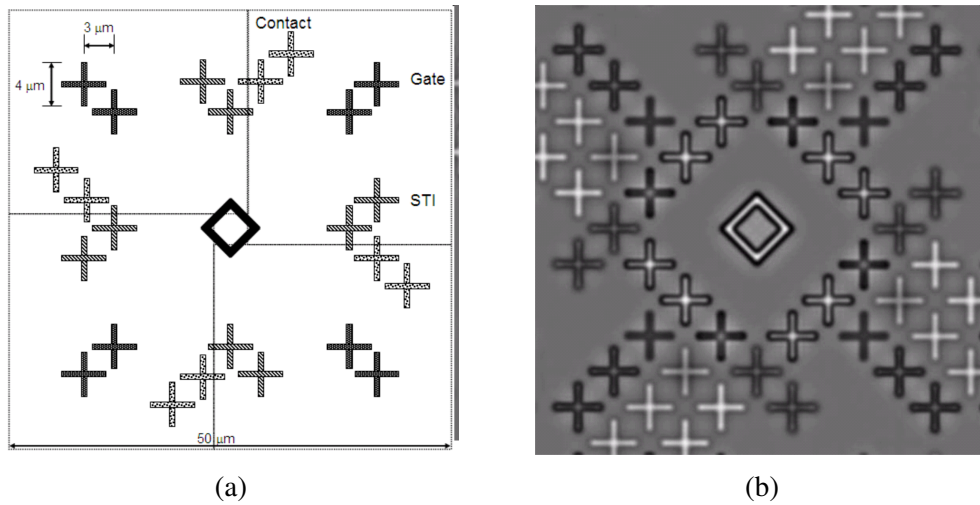


FIGURE 1.21 (a) Schéma d'une mire Blossom contenant les niveaux STI, Contact et Grille. La mire est dessinée par la répétition du cadran en haut à droite autour d'un point de symétrie centrale servant de motif de reconnaissance. (b) Image optique d'une mire Blossom après gravure contact [43].

Avec l'introduction du *multi-patterning* impliquant un nombre grandissant de masque, il est devenu intéressant de minimiser l'espace occupé par la métrologie OVL. Des nouvelles mires dites Blossom ont tout d'abord été présentées par N. Felix en 2010 [43]. Ces mires, représentées Figure 1.21, se composent de croix disposées de manière symétrique autour d'un point central. Pareillement à la mire AIM, un cadran est répété quatre fois avec des rotations successives de 90° . Pour chaque niveau d'intérêt, deux croix composent le cadran ce qui fait huit croix par niveau sur la mire. Une surface de $50 \mu\text{m}$ de côté peut alors accueillir une multitude de mire pour chaque niveau : ce type de mire donne la capacité de mesurer l'overlay entre plusieurs niveaux en une seule prise d'image.

Le constructeur d'équipement à l'origine de la mire AIM présente en 2012 une mire AIMiD fonctionnant sur le même principe [41]. Celle-ci est plus petite, avec une empreinte de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ contre $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ pour la mire AIM tout en maintenant de bonnes performances. N. Amir propose l'année suivante une version pluri-niveaux de ces mires représentées Figure 1.22 [44]. La mire AIMiD peut être dessinée pour des dimensions entre $5 \mu\text{m}$ et $10 \mu\text{m}$ selon le besoin, ce qui lui permet d'être intégrée aux EMET contrairement aux mires AIM.

D'autres améliorations ont été apportées par la suite pour suivre les contraintes de réduction des spécifications d'overlay et du rétrécissement des dimensions des structures CMOS. C'est le cas notamment des Diagonal AIM (DAIM) destinées aux structures inclinées comme les mémoires 3DNAND et DRAM, ou encore les mires robust AIM (rAIM) basées sur l'effet de Moiré pour amplifier optiquement l'overlay de la cible [45, 46]. Ces mires sont

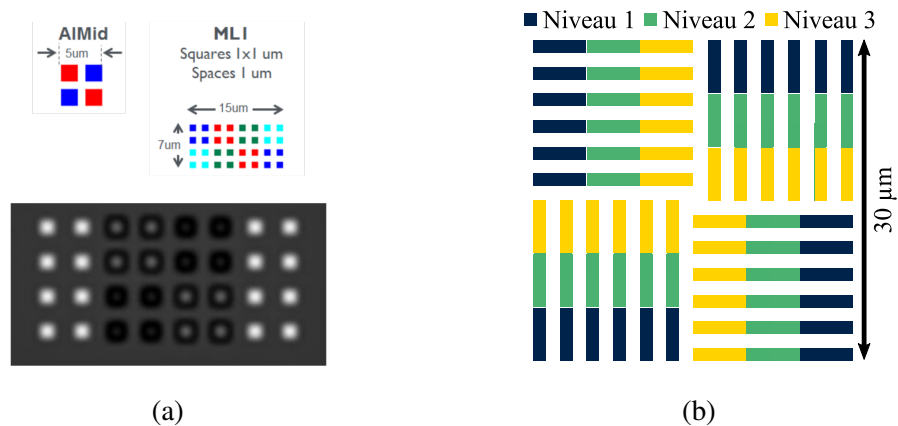


FIGURE 1.22 (a) Schéma et image optique de mire AIMiD et Multi-Layer AIMiD. (b) Schéma de mire AIM multi-layer. Adapté de [44].

représentées Figure 1.23. Cette dernière mire OVL a une conception similaire à la mire AIM : elle est composée de deux parties interne (*inner*) et externe (*outer*). Son analyse fonctionne de même par l'analyse du barycentre des structures vues sur l'*inner* et l'*outer*. Ces deux parties sont constituées de deux réseaux de lignes superposés, ayant un pas différent l'un de l'autre (P et S pour l'*inner*, Q et T pour l'*outer*). Ces pas ne peuvent pas être résolus par l'instrument de mesure optique, mais l'interférence du signal provenant des deux réseaux génère un motif de dimension supérieure visible comme représenté dans la Figure 1.23b. Le déplacement de ce motif est plus important que celui des réseaux individuels. Pour un réseau utilisant $P = T = 350 \text{ nm}$ et $Q = S = 400 \text{ nm}$ un gain de 8 a pu être démontré : un overlay sur la plaque de 1 nm sera vu de 8 nm par l'instrument de mesure. Cette astuce permet non seulement d'améliorer la résolution de la mesure, mais aussi d'améliorer le TIS et le TMU qui sont eux aussi divisés par le gain de Moiré.

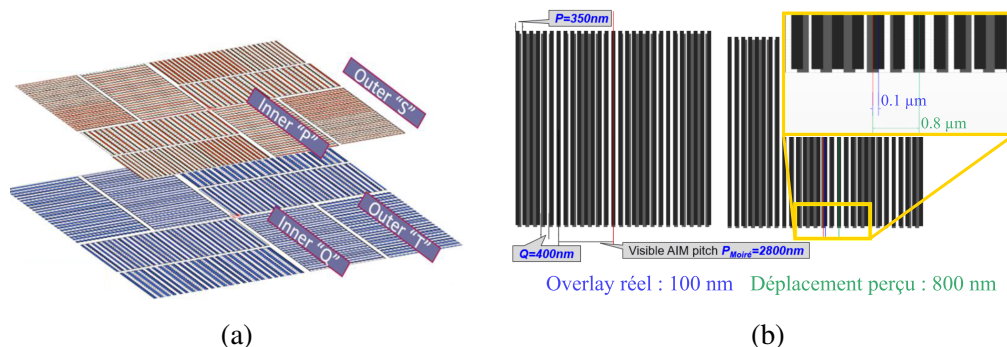


FIGURE 1.23 (a) Conception de la mire rAIM avec 4 pitches différents : P, Q, S, T. (b) Illustration du phénomène d'amplification de Moirée sur la lecture optique de la mire [45, 46].

Finalement, la métrologie overlay par imagerie optique (IBO) est relativement facile à mettre en production, a un débit élevé en ligne de production et est très robuste grâce à sa large mire qui permet l'intégration du signal sur une grande surface. L'IBO souffre cependant de certaines limitations : réduire les dimensions de la mire tout en maintenant les performances (TMU) est un réel défi. De plus, même en segmentant les mires il est compliqué de respecter les règles de dessin dans la conception de cette dernière. Pour mitiger ces limitations sans perdre en débit de mesure, une seconde approche optique a été développée : la mesure OVL par diffraction.

DBO (Diffraction Based Overlay)

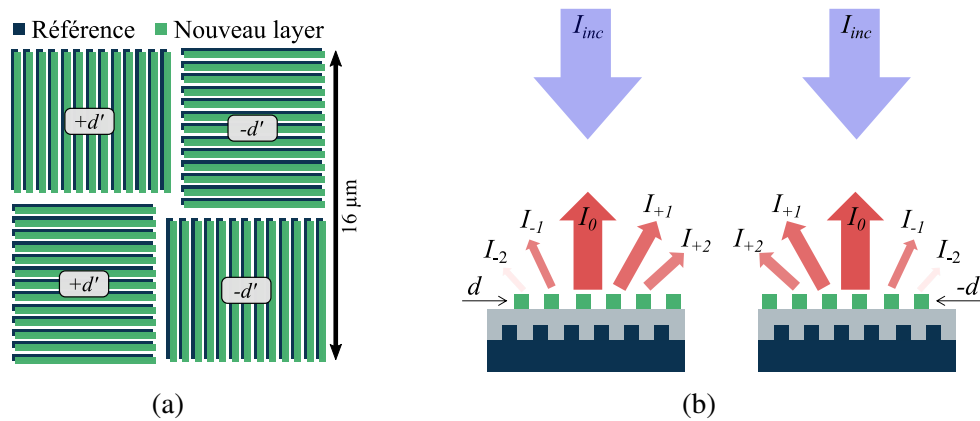


FIGURE 1.24 (a) Schéma d'une mire μ DBO. (b) La métrologie overlay par diffraction se base sur une différence d'intensité entre deux ordres de diffractions selon le déplacement entre deux réseaux.

La mesure d'overlay par diffraction - DBO pour *Diffraction Based Overlay* ou encore SCOL pour *Scatterometry Overlay* - a été mise en place en production à partir des nœuds technologiques inférieurs à 30 nm [47]. La cible, schématisée Figure 1.24a, est constituée de deux réseaux de diffraction superposés désalignés volontairement d'une distance $\pm d'$. Comme représenté dans la Figure 1.24b, lorsqu'un désalignement est présent entre les deux couches étudiées, le décalage entre les réseaux provoque une asymétrie dans le signal diffracté $I_{assy} = I_{+n} - I_{-n}$ où n correspond à l'ordre de diffraction. Dans un certain intervalle, cette asymétrie est proportionnelle au premier ordre au décalage d entre les réseaux : $I_{assy} = k \times d$. L'ajout d'un décalage connu de signe opposé sur les cadrants ($\pm d'$) permet de retrouver le facteur k :

$$\left. \begin{aligned} I_{assy,1} &= k \times (d' + OVL) \\ I_{assy,2} &= k \times (-d' + OVL) \end{aligned} \right\} \implies k = \frac{I_{assy,1} - I_{assy,2}}{2d'} \quad (1.11)$$

Similairement à la mire AIM, la diminution des dimensions des motifs du produit a mené cette mire à être miniaturisée en μ DBO de côté inférieur à 20 μ m pour être placée dans les lignes de découpe intra-puces ainsi que dans les EMET [48–50]. Plus récemment, l'utilisation de plusieurs longueurs d'ondes pour une même mesure permet d'obtenir une meilleure robustesse vis-à-vis de l'asymétrie des réseaux de lignes et une réduction du NZO [51, 52]. Salerno *et al.* proposent en 2018 une mire conçue à partir du produit ou d'une cellule SRAM afin d'améliorer la représentativité de la mire μ DBO [52, 53]. L'objectif est de faire une mire de petite dimension (25 μ m²) pouvant être intégrée au plus proche du circuit afin de mesurer optiquement l'OPO. Le processus de conception de la mire est représenté Figure 1.25 : Une cellule d'intérêt est sélectionnée, puis pour chaque niveau le motif est symétrisé et répété afin de simplifier la structure. Les axes où l'overlay est le plus critique possèdent des bords plus long, c'est notamment le cas de l'overlay selon X entre les niveaux Contact et Grille sur la technologie utilisée par A. Salerno [53].

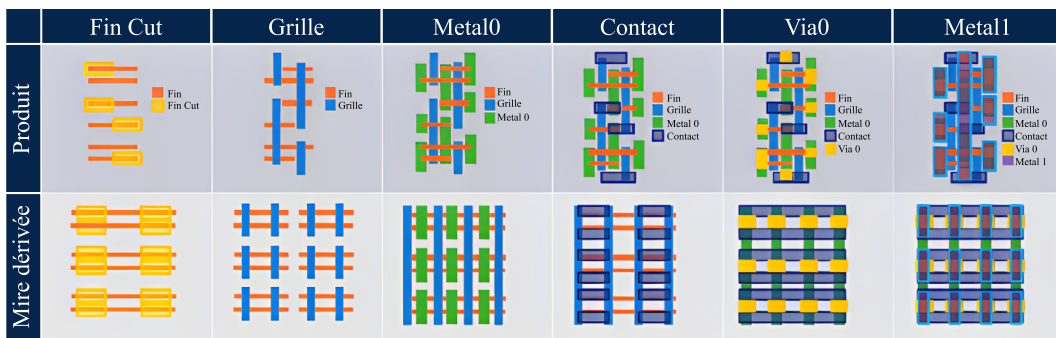


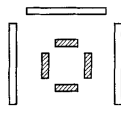


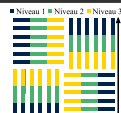

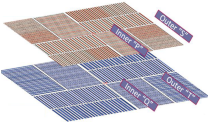
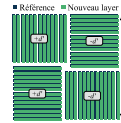
FIGURE 1.25 Mire DBO dérivée du produit. Adaptée et traduite de [53].

La mesure de l'overlay par diffraction est une alternative relativement récente par rapport à la mesure IBO. Elle a deux avantages majeurs :

1. Le signal diffracté est moins impacté par les aberrations de la colonne optique et de la source lumineuse. Le TIS est alors intrinsèquement plus faible et donc le TMU est meilleur [54];
2. La différence entre deux signaux rend la technique moins sensible aux variations du point de focale. Cet élément rend la mesure plus robuste aux variations du procédé et améliore le *matching* entre les équipements [54, 55].

Le TMU du DBO atteint des valeurs bien inférieures au nanomètre. Ceci explique son utilisation dès le nœud 35 nm où l'incertitude sur la mesure doit être inférieure à 0.64 nm

TABLE 1.1 Résumé des méthodes de mesure optiques de l'overlay.

Mire	Principe	EMET	Multi-niveau	Schéma	Refs
BiB / FiF	Barycentre	Non	Non		[37, 39]
AIM	Barycentre	Non	Non		[40-42]
AIMiD	Barycentre	Oui	Oui		[41, 44]
Multi-AIM	Barycentre	Non	Oui		[44]
Blossoms	Barycentre	Oui	Oui		[43]
Robust-AIM	Barycentre effet Moiré	Oui	Oui		[45, 46]
SCOL / μ DBO	Diffraction	Oui	Non		[47]

[56]. De plus, la mesure DBO possède un troisième avantage non négligeable : l'utilisation de la diffraction permet d'utiliser des motifs non résolus optiquement. Les mires DBO peuvent donc respecter les règles de dessin de nœuds avancés. Pouvant être placées dans les EMET avec des dimensions proches du produit ces mires ont un NZO plus faible. La mesure DBO a cependant un désavantage vis-à-vis de la mesure IBO : étant basée sur un modèle de diffraction, elle est plus complexe à mettre en œuvre. L'empilement sous-jacent aux couches d'intérêt a une influence sur l'intensité du signal mesuré. Cela rend la conception des mires plus longue et plus coûteuse. Cette mesure est donc généralement réservée aux nœuds agressifs et aux produits à longue durée de vie afin de rentabiliser l'investissement.

Le tableau 1.1 récapitule les différentes mesures en ligne de l'overlay par des méthodes optiques.

Limites de la mesure overlay optique

La mesure optique de l'overlay présente de nombreux avantages qui font d'elle la méthode la plus couramment utilisée : robustesse de la mesure, faible incertitude de mesure (TMU), facilité de mise en place dans un environnement HVM. Ces méthodes ont cependant deux limitations intrinsèques : l'utilisation de large mire (1) masque les variabilités locales de l'overlay et (2) génère un possible biais (NZO) entre la mesure et l'overlay réellement sur la plaque. La Figure 1.26 montre différentes étapes qui sont connues pour générer des artefacts de métrologie overlay [24].

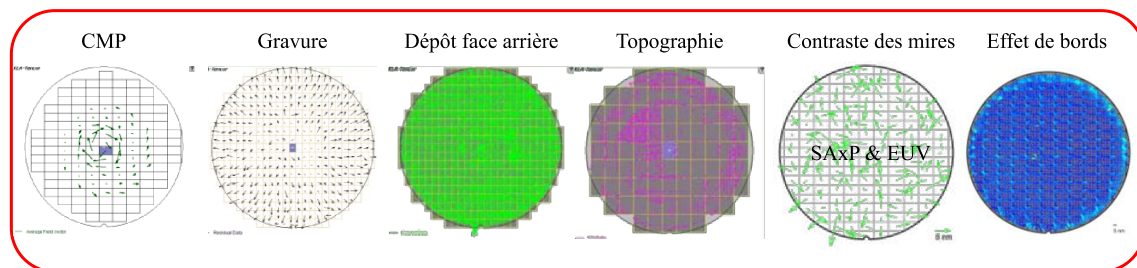


FIGURE 1.26 Comparaison de différentes signatures faussées d'overlay et leur origine. Complémentaire de la Figure 1.16 et adaptée de [24].

Les étapes de CMP posent des défis pour la mesure de l'overlay [57, 58]. La planarisation des mires réduit le contraste des mires d'alignement et de mesure. Pour cela un léger renforcement est laissé volontairement sur les mires tel que sur la Figure 1.27a(ii) [19]. Un renforcement trop faible conduira à une perte de signal pour l'instrument de mesure (i) tandis qu'un renforcement asymétrique génère un biais dans la mesure optique de l'overlay (iii). La signature de l'overlay mesuré sera alors semblable à celle représentée Figure 1.26 et peut varier avec la profondeur du renforcement. De même, les dépôts et les gravures peuvent présenter une asymétrie. La Figure 1.27b montre que sur les bords de plaque les ions pulvérisés arrivent avec un certain angle non orthogonal. Cela résulte en un dépôt ou une gravure asymétrique dépendant de la hauteur et de la largeur des motifs. Les motifs dédiés à la mesure optique ayant des largeurs d'un ordre de grandeur supérieures à celles du produit, les mires sont plus sujettes à ce phénomène. Cette différence de comportement entre la mire et le produit est l'une des sources du NZO. Ce biais peut être atténué en développant des mires aux dimensions plus proches de celles du produit, comme les mires μ DBO ou AIMiD, ou alors en segmentant les mires avec des motifs non résolus, de dimensions inférieures à la longueur d'onde de mesure. Le positionnement des mires dans des lignes de découpe est aussi source d'un biais entre la mesure en ligne et l'overlay réellement présent sur le produit. L'environnement de la mire est notamment très différent de celui du produit, ce qui peut causer des déformations différentes sur la mire de sur le produit.

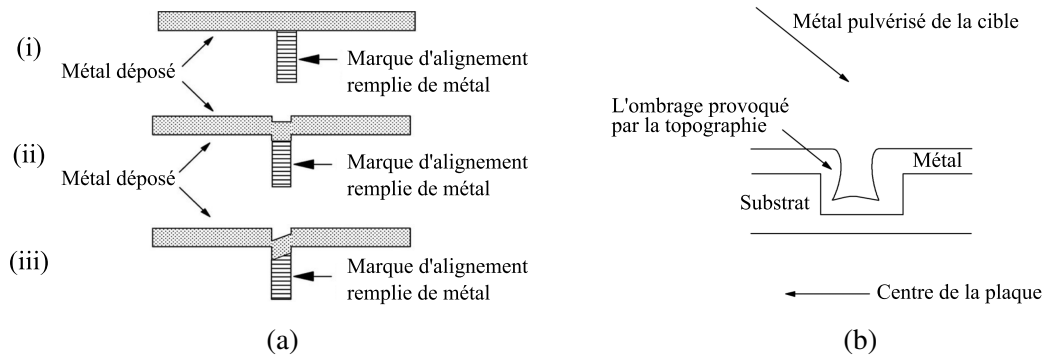


FIGURE 1.27 (a) Un métal déposé de manière asymétrique sur des mires d'alignement ou de mesure d'OVL cause du NZO. (b) La CMP peut aussi causer de l'overlay et détériorer les mires d'alignement. (i) Une mire polie plate, (ii) une mire renfoncée symétriquement, (iii) une mire renfoncée asymétriquement. Traduit de [19].

Avec les nœuds de plus en plus agressifs et les besoins de qualité de plus en plus exigeant, les spécifications sur l'EPE sont de plus en plus serrées. Il devient alors important de quantifier les variations locales : le NZO n'est plus négligeable devant la spécification OVL. Pour répondre à ces défis, une approche complémentaire de mesure de l'overlay a été développée : la mesure électronique.

1.3.2 Mesure électronique (SEM-OVL)

La mesure de l'overlay par SEM est utilisée en complément de la mesure optique et n'a pas pour ambition de la remplacer. Représenté Figure 1.28, le SEM-OVL s'ajoute à la mesure optique en tant que référence, en général après la gravure. Étant donné que la mesure par SEM est plus lente que la mesure optique (d'un facteur 10 [59]), elle intervient moins fréquemment avec un échantillonnage plus élevé. L'objectif est de quantifier l'EPE et les variations locales de l'overlay ainsi que de corriger les possibles biais dus à la métrologie optique et à la gravure. Une autre application de l'overlay SEM est l'amélioration du modèle utilisé dans l'APC. En effet, la qualité du modèle de correction dépend de l'uniformité de la répartition des points de mesure dans un champ d'exposition mais les mires d'overlay optique sont contraintes à un positionnement dans les lignes de découpe. C. Wu *et al.* proposent notamment en 2021 un modèle hybride comprenant des mesures optiques complétées par des mesures SEM afin de minimiser l'incertitude sur le modèle de correction [60].

Originellement, cette mesure est réalisée sur des CD-SEM, des SEM dédiés à la mesure du CD. Avec des tensions inférieures à 5 keV, cette mesure ne peut être effectuée que lorsque les deux niveaux sont visibles en surface. C'est notamment le cas après gravure lors de *multi-patterning* ou entre les niveaux Grille - Active et Active - NOSO. Afin de permettre la mesure

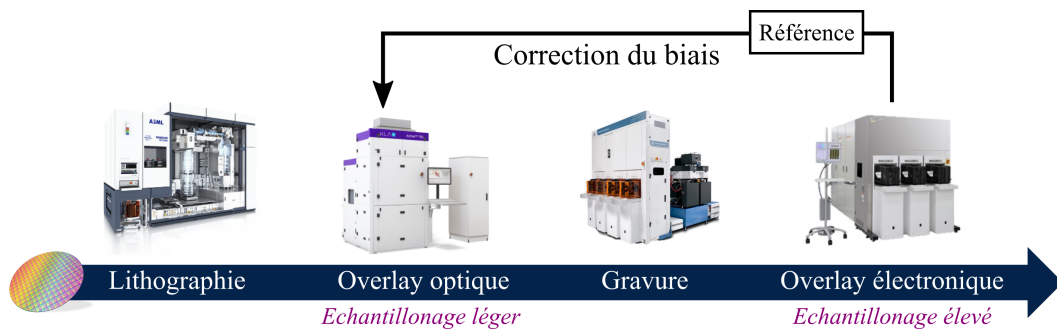


FIGURE 1.28 Positionnement de l'overlay SEM dans l'industrie.

SEM-OVL après lithographie ou lorsque l'un des niveaux est masqué tel que l'OVL Contact-Grille, une gamme de SEM à haute tension (HV-SEM) a été développée pour atteindre des tensions d'accélération de 50 kV [61]. L'association de capteurs d'électrons secondaires classiques avec des capteurs d'électrons rétro-diffusés permet de voir des couches enterrées de quelques centaines de nanomètres lorsque des tensions d'accélération supérieures à 15 kV sont utilisées (cf Figure 1.29). Le principe de fonctionnement des SEM sera expliqué plus en détail dans le chapitre 2. Ces SEM conçus pour la mesure OVL ont l'avantage d'avoir un débit plus élevé et de grands champs de vision (FoV) tout en maintenant de faibles distorsions.

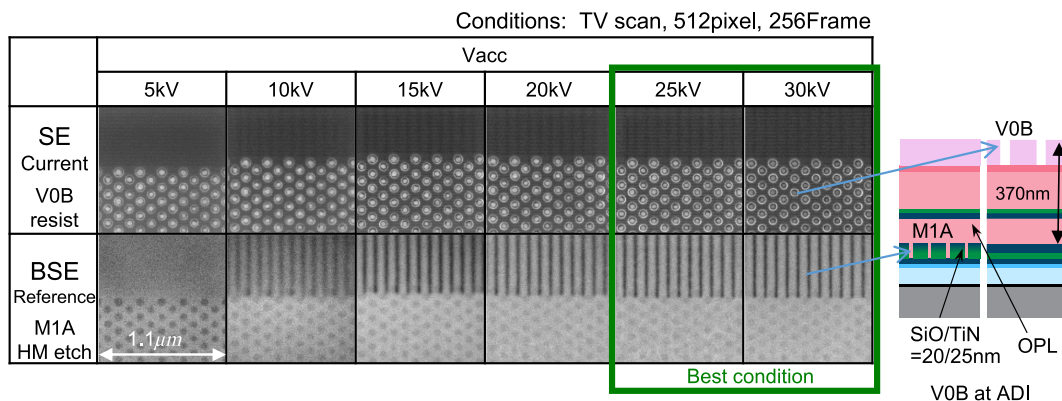


FIGURE 1.29 Images SEM-OVL utilisant un HV-SEM après lithographie et le schéma de l'empilement en coupe associé [62]. Les termes de Secondary Electrons (SE) et de Back-Scattered Electrons (BSE) sont définis dans le chapitre 2.

Il peut être intéressant de discerner deux types de mesures SEM-OVL : les mesures sur des mires dédiées proches de la puce dans les EMETs, et les mesures directes sur le produit.

Mesure dans les EMETS (*in-die*)

La forme la plus courante de la mesure overlay SEM correspond à une mesure sur une mire dédiée située dans les EMETs ou dans les lignes de découpe grâce à des mesures CD. P.

Leray *et al.* détaillent en 2017 cette méthode conventionnelle sur un niveau ligne effectué en *double-patterning*, représenté Figure 1.30 [24]. Soit une mire contenant une ligne 2 de dimension CD_2 encadrée par deux lignes 1 de CD identiques CD_1 . L'équation 1.12 démontre qu'il est possible de mesurer l'OVL entre ces lignes à partir de deux mesures dimensionnelles d_1 et d_4 représentées Figure 1.30a. La même année cette approche est étendue aux motifs imbriqués en mesurant l'écart entre les bords des motifs [59].

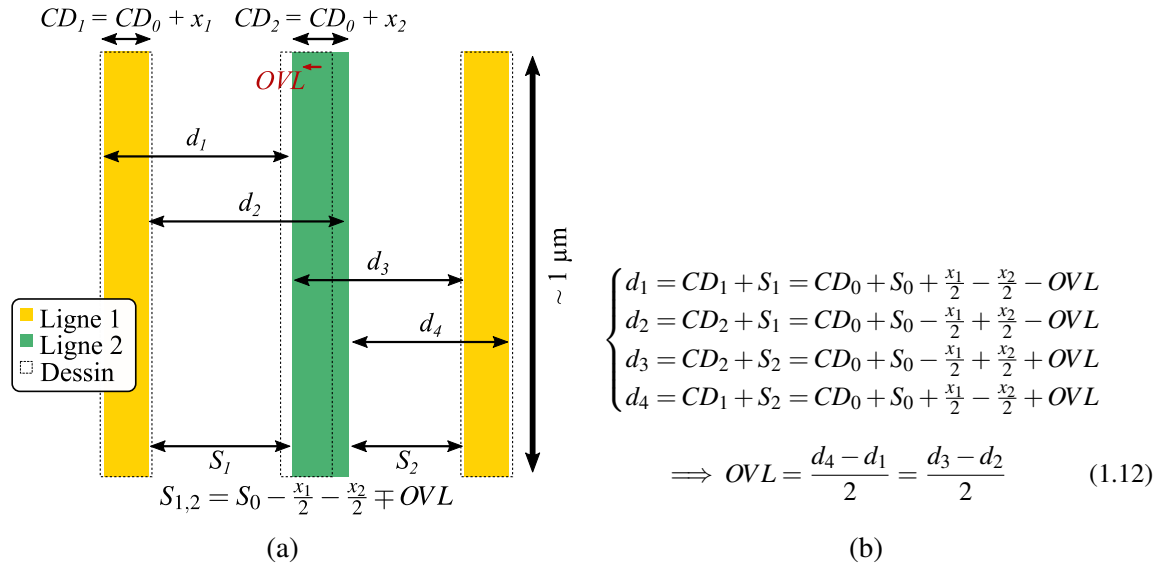


FIGURE 1.30 Principe de mesure de l'OVL par CD-SEM par mesure de CD. Exemple d'un cas simple de *double patterning* d'un niveau Ligne. (a) Schéma de la mire de mesure et des différentes dimensions d'intérêt. (b) L'OVL peut être calculé comme une simple différence entre deux mesures de distances. Adapté de [24].

Une alternative se basant sur la détection des barycentres est aussi courante [59, 63, 64, 62, 65]. Dans ce cas la mire est similaire aux mires AIMiD de la mesure IBO. Schématisé Figure 1.31, chaque quadrant est dédié à une composante de l'OVL, et deux matrices de trous et/ou de lignes sont exposées à proximité [63]. Une prise d'image SEM permet l'extraction des contours des trous et/ou des lignes afin d'en déterminer le centre de gravité (CoG). La mire étant symétrique selon un axe vertical, l'overlay en X est calculé comme la composante X de la différence entre les barycentres des deux niveaux. Cette méthode est mature et est déjà utilisée dans les environnements HVM en tant que référence à l'OVL optique conformément à la Figure 1.28 [62, 47, 59].

Mesure sur le produit (*on-device*)

Un autre intérêt de la mesure par SEM est la capacité à mesurer l'OVL et l'EPE directement sur le produit (OPO). La mesure directe sur le produit, sans mire dédiée amène de

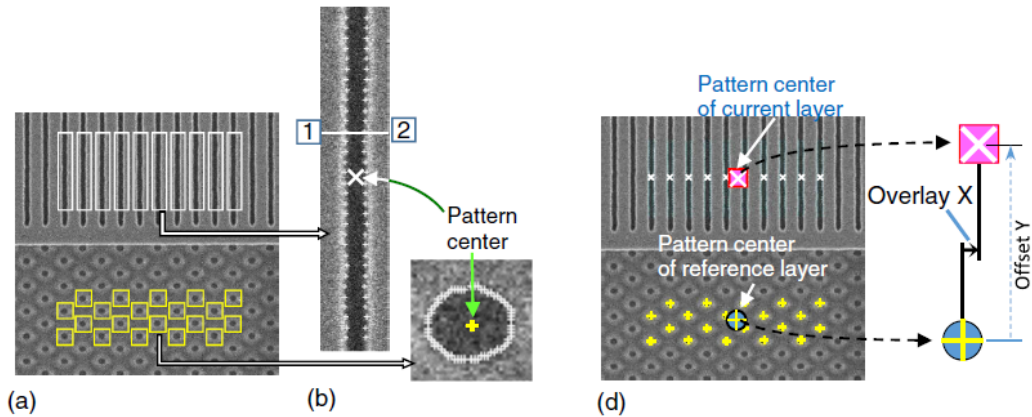


FIGURE 1.31 Principe de fonctionnement de la mesure d’overlay par mesure de barycentre [63].

nombreux défis. Tout d’abord, les motifs ne sont pas optimisés pour la mesure et donc pas nécessairement symétriques. De plus, les différents niveaux sont connectés entre eux et donc les motifs vont généralement se superposer. Cela résulte en un niveau inférieur partiellement masqué même dans le cas d’une mesure par HV-SEM. Le choix du motif observé va avoir une influence sur la facilité et sur la qualité de la mesure. Pour dépasser cette contrainte de masquage du niveau inférieur, plusieurs méthodes ont été développées.

F. Weisbuch et J. Schatz proposent en 2019 une méthode pour caractériser l’EPE ainsi que l’OVL entre le niveau Contact et Grille en utilisant des CD-SEM [65]. La méthode est détaillée Figure 1.32.

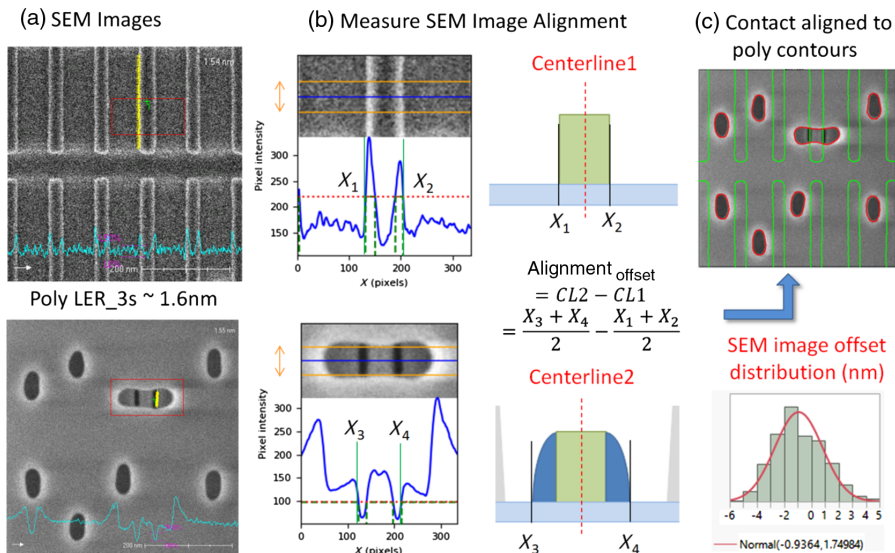


FIGURE 1.32 Caractérisation de l’EPE et de l’OVL entre le niveau Contact et Grille par mesures dimensionnelles (CD-SEM) [65].

Grâce à des mesures dimensionnelles, les distributions de l'EPE et de l'OVL peuvent être quantifiées. Deux images SEM sont prises, l'une post-gravure Grille et l'autre post-gravure Contact. L'ouverture des contacts permet de voir les grilles avec leur espaceurs en-dessous. Il est alors possible de réaligner les images entre elles sur les motifs visibles afin de réaliser une estimation des EPE et de l'OVL. L'implémentation d'une telle méthode dans un environnement HVM est compliquée par la prise de deux images SEM et par le besoin d'adapter la combinaison de mesures dimensionnelles pour chaque motif mesuré. B. Le-Gratiet *et al.* appliquent une méthode similaire en 2020 pour étudier l'EPE entre le niveau Grille et les implants [66].

Des alternatives n'utilisant qu'une seule image SEM ont été proposées. Pour cela elles utilisent la connaissance préalable que l'on a de la structure à mesurer : une image de référence, la forme attendue ou encore le dessin de la puce. En 2013 J. Oh *et al.* proposent une approche basée sur une image de référence dite *golden* [67]. Après reconnaissance des motifs et des niveaux d'intérêt sur l'image de test et sur l'image *golden*, la mesure du décalage pour chacun des niveaux par rapport à cette dernière permet de remonter à une mesure de l'overlay. Une seconde approche consiste à extrapoler la partie masquée du niveau inférieur. Dans le cas d'un maillon VIA/ligne, la Figure 1.33a montre qu'il est par exemple possible de trouver un cercle qui minimise la distance aux points visibles du VIA afin d'extrapoler la partie manquante [68]. L'extraction de contour SEM avec des très hautes tensions a permis le développement de la métrologie SEM-OVL basée sur l'utilisation du *design*. Le groupe de Hyunjo Yang propose notamment dès 2014 la méthode représentée Figure 1.33b [47, 69, 70].

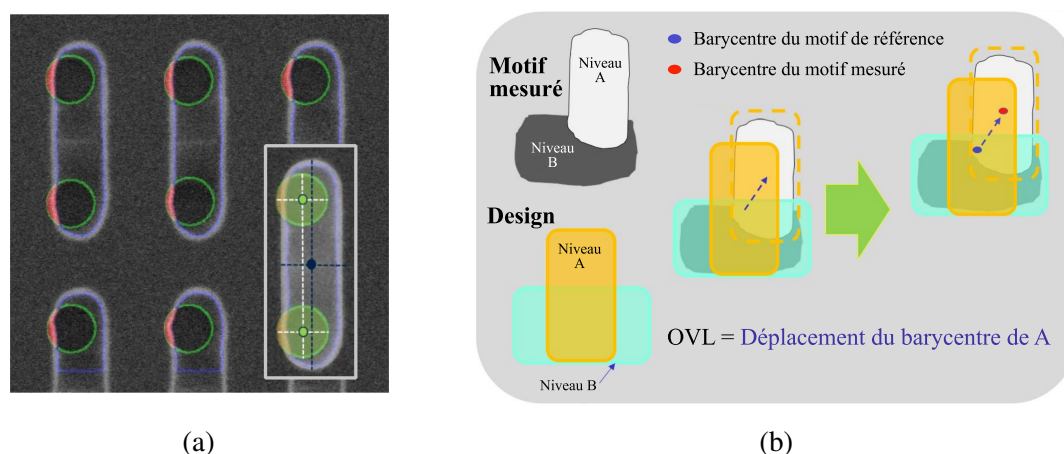


FIGURE 1.33 (a) Mesure de l'overlay par SEM dans un maillon VIA / Ligne par d'extrapolation de la partie masquée à partir d'une régression paramétrique d'un cercle [68]. (b) Principe de mesure de l'OVL sur le produit à partir d'une information *design*. Adapté et traduit de [69].

Grâce à l'utilisation de tensions élevées et de capteurs à électrons rétro-diffusés, deux images SEM sont prises à la même étape : chacune des images est optimisée pour un certain niveau [47]. Le contour du motif supérieur est détecté en premier, puis l'information provenant du *design* assiste l'extraction du contour du motif inférieur sur la seconde image. La différence entre les barycentres des deux motifs donne alors l'erreur d'overlay.

Les SEM peuvent être utilisés astucieusement pour mesurer l'overlay entre deux structures enterrées. Le VC-SEM, de l'anglais *Voltage-Contrast Scanning Electron Microscope*, consiste à utiliser la concentration en électrons de la surface mesurée. Le faisceau d'électrons du SEM vient extraire des électrons secondaires de la surface du motif observé. Si ce motif est connecté au substrat, alors de nouveaux électrons viennent les remplacer et la concentration en électrons demeure constante. Au contraire, si le motif est flottant alors ce motif va apparaître plus sombre car il n'y a pas de flux d'électrons pour remplacer ceux extraits par le scan du SEM. L'intensité du signal sur ce motif donne donc une information sur la surface de contact avec la couche inférieure, qui est directement reliée à l'overlay et au CD du motif. Représentée Figure 1.34a, cette méthode permet une mesure *a priori* plus qualitative que quantitative de la mesure de l'overlay. Une seconde méthode alternative consiste à utiliser un SEM à impulsions [62, 71, 72]. La présence d'une structure conductrice enterrée va avoir tendance à ralentir l'émission des électrons secondaires due à une capacité plus élevée. En ajustant le temps entre deux impulsions à la bonne durée (de l'ordre de la microseconde), il est possible d'observer un contraste élevé entre la surface seule et la surface où un motif conducteur est enterré. La Figure 1.34b montre le résultat sur un maillon VIA/Ligne [62]. Une telle imagerie SEM à faible potentiel peut aussi permettre la mesure de l'overlay sur le produit à la place d'une mesure HV-SEM. La tension d'accélération étant plus faible d'un ordre de grandeur, les dommages réalisés sur la structure sont négligeables.

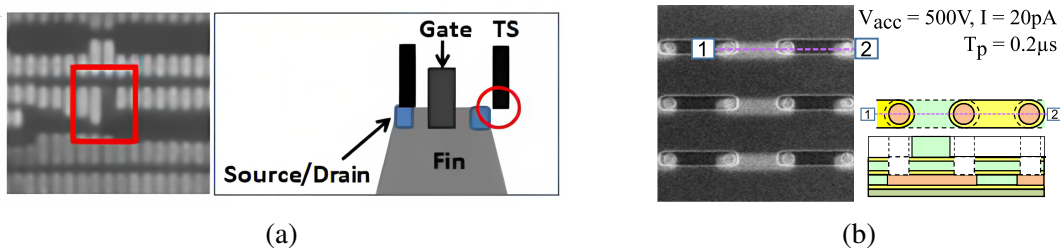
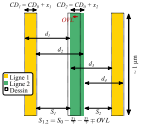
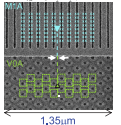
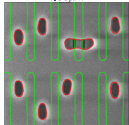
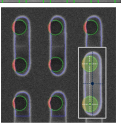
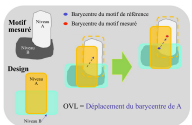
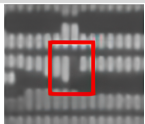
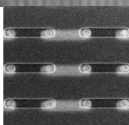


FIGURE 1.34 (a) La mesure de l'OVL par Voltage-Contrast SEM. L'intensité lumineuse du contact diminue avec l'overlay : le flux d'électron depuis le substrat est plus faible. (b) Une alternative à faible énergie consiste au SEM pulsé. En ajustant la bonne fréquence de pulse il est possible d'observer les motifs conducteurs enterrés [62].

Le tableau 1.2 récapitule les différentes mesures en ligne de l'overlay à l'aide de microscopes électroniques.

TABLE 1.2 Résumé des méthodes de mesure électroniques de l'overlay.

Équipement	Principe	Sur le produit	Schéma	Refs
CD-SEM HV-SEM	CD	Non		[24]
CD-SEM HV-SEM	Barycentre	Non		[59, 62–65]
CD-SEM	CD sur 2 images réalignées	Oui		[65]
CD-SEM	Barycentre par ap- proximation du cercle	Non		[68]
HV-SEM	Barycentre avec information <i>design</i>	Oui		[47, 69, 70]
VC-SEM	Densité de porteur	Oui		[73, 74]
SEM pulsé	Barycentre / CD	Oui		[62, 71, 72]

Défis de la métrologie SEM-OVL

La métrologie OVL par SEM présente de nombreux avantages complémentaires à la métrologie optique. Le petit FoV et la haute résolution des SEM permettent une mesure locale de l'overlay afin d'en quantifier sa variabilité. Ces propriétés permettent la mesure directe sur le produit : la taille des pixels étant de l'ordre du nanomètre, l'intégration sur une grande mire dédiée telle que la mire AIM ou DBO n'est pas nécessaire. Une mesure directe de l'OPO est alors possible afin de mettre en avant le possible NZO de la mesure optique et de le corriger. Plusieurs défis sont cependant encore à relever pour faciliter cette mesure directe sur le produit, sans mire dédiée :

Temps d'acquisition élevé : Le scan de la surface par le faisceau d'électron fait de la métrologie SEM une métrologie intrinsèquement lente par rapport à la métrologie optique. Même si les équipements récents ont un débit nettement supérieur, la mesure SEM demeure complémentaire à la mesure optique et n'a pas pour ambition de la remplacer ;

Faible pénétration des électrons : La profondeur de pénétration des électrons incident est relativement faible. Cela mène à deux possibilités : soit (1) les deux niveaux d'intérêt sont découverts et la mesure à faible tension de l'OVL est possible, soit (2) le niveau de référence est enterré et l'utilisation de tensions d'accélération très élevée (>25 kV) ainsi que l'observation des électrons rétro-diffusés est nécessaire pour percevoir ces motifs. Cette seconde approche demande des équipements récents et relève des difficultés d'homogénéité des résolutions entre les électrons rétro-diffusés et les secondaires ;

Dégradation du produit : L'énergie élevée des électrons arrivant sur la surface du produit est susceptible d'endommager la puce. Pour cela, la métrologie SEM-OVL sur le produit est généralement effectuée post-gravure ;

Superposition de couches : La mesure étant réalisée sur le produit directement, les motifs observés sont généralement superposés. Le choix des motifs sur la plaque et la capacité de mesure sur des motifs partiellement masqués est un réel défi. La prise en compte de la partie masquée à l'aide des connaissances sur le motif observé (seconde image, paramétrisation, *design* ...) est nécessaire ;

Motifs fonctionnels : Les motifs du produit ne sont pas pensés pour être mesurés. Le choix du motif inspecté est alors important : la non-symétrie, la longueur totale de bords disponibles et leurs orientations influent sur la qualité de la mesure. Il est par ailleurs important de prendre en compte l'impact de l'OPC et de la fabrication du masque pour ne pas biaiser l'interprétation des mesures SEM-OVL.


L'essentiel

Cette section a présenté un **état de l'art** exhaustif de la métrologie overlay en ligne. La **métrologie optique (Opt-OVL)** est la plus couramment utilisée. L'IBO comme le DBO présentent des avantages intrinsèques de robustesse, de répétabilité, de polyvalence et de débit de mesure nécessaires à l'environnement HVM. Cependant la faible représentativité des mires optiques et leur positionnement dans les lignes de découpe sont responsables d'un **biais entre la mesure optique et l'overlay sur le produit (OPO)**. Avec le resserrement des spécifications sur l'OVL et sur l'EPE, **ce biais (NZO) n'est plus négligeable** devant celles-ci. Permettant une mesure plus locale et de haute résolution, le SEM-OVL s'est répandu dès l'introduction des niveaux *multi-patterning* comme étant **complémentaire à la métrologie Opt-OVL** en tant que référence. De nombreux défis sont encore à relever pour cette approche électronique : le débit de mesure est bien plus faible et la non-transparence des couches aux électrons nécessite de fortes tensions d'accélération. L'application de la métrologie SEM-OVL directement sur le produit, sans mire dédiée, rajoute à cela des problématiques de superposition de motifs et de dégradation du produits.

Cette thèse s'inscrit dans cette tendance d'inclusion de la métrologie SEM-OVL directe sur le produit pour mieux contrôler l'EPE et les variabilités de l'overlay. Le contexte de celle-ci et les objectifs sont explicités dans la section suivante.

1.4 Positionnement de la thèse et objectifs

1.4.1 Contexte industriel

Cette thèse CIFRE a été réalisée dans le cadre de l'étroite collaboration entre le laboratoire de recherche CEA-Leti et l'industriel STMicroelectronics à Crolles. Ce travail s'inscrit dans la continuité des travaux des deux entités. D'une part le groupe de lithographie computationnelle (CLG ) du CEA-Leti fait parti d'un laboratoire commun avec ASELTANanographics, une start-up¹ issue en 2009 des travaux du même groupe. Celle-ci est spécialisée dans l'extraction de contour sur des images SEM à partir d'informations *design*. D'autre part l'équipe encadrant la thèse côté industriel explore l'utilisation des contours SEM depuis plusieurs années au travers de la thèse de A. Lakcher [75, 76], et de collaborations avec des industriels [21, 22, 66]. Ces différents travaux ont convergé vers l'implantation sur le site

1. ASELTANanographics a été rachetée en 2023 par l'équipementier Applied Materials

de Crolles d'une infrastructure de post-traitement d'images SEM par extraction de contour à l'aide du logiciel SIMPL développé par ASELTA Nanographics. Nommée *ImageLab*, cette infrastructure et son impact sur la thèse seront détaillés dans le prochain chapitre. Dans ce contexte, deux thèses évaluant l'apport de l'utilisation de contours SEM pour STMICROELECTRONICS ont été lancées : celle-ci portant sur la mesure de l'overlay SEM, ainsi que celle défendue par Elvire Soltani axée sur les différentes mesures dimensionnelles locales permises par les contours [20].

1.4.2 Objectifs

La qualité et fiabilité des puces exigées par les marchés automobiles poussent à un meilleur contrôle du procédé de fabrication. L'arrivée du *multi-patterning* avec les nœuds sub-28 nm complexifie davantage le contrôle de l'overlay. La thèse présentée ici est motivée par ces éléments et a pour objectif d'évaluer l'intérêt pour STMICROELECTRONICS d'introduire en production la mesure SEM-OVL sur le produit. Pour cela, trois questions majeures ont été étudiées :

1. Est-il possible de réaliser de la métrologie On-Product SEM-OVL, i.e. directe sur le produit, avec les outils et équipements actuellement disponibles à STMICROELECTRONICS ?
2. Quelle est l'amplitude de l'On-Product Overlay (OPO) et du Non-Zero Offset (NZO) ?
3. Comment peut-on utiliser cette information supplémentaire pour améliorer le rendement et la fiabilité des puces ?

La première interrogation s'inscrit dans les travaux précédents des deux entités. STMICROELECTRONICS, à ce jour, ne dispose majoritairement que de CD-SEM. Ces SEM sont dédiés à la mesure du CD en ligne et leur tension d'accélération est limitée à 5 kV. La première étape de la thèse a donc été de développer deux méthodes de mesure d'overlay SEM sur le produit compatibles avec les CD-SEM à disposition et utilisant un logiciel d'extraction de contour SEM. Le chapitre 2 détaille le fonctionnement et la mise en place de ces deux approches tandis que le début du chapitre 3 s'appliquera à vérifier les performances de ces dernières.

Les chapitres 3 et 4 proposeront des réponses aux deux dernières interrogations. En particulier, la Figure 1.35 fait référence à la seconde interrogation [77]. Les équipements actuels de métrologie optique sont capables de quantifier l'amplitude de la variation de l'overlay à l'échelle de la plaque et du champ, i.e. sur des distances de l'ordre de la centaine de micromètres. Mais quelle est en réalité l'amplitude de la variation de l'overlay à des échelles plus courtes ? En particulier à l'échelle d'une puce ou encore d'un motif sur une

distance de quelques dizaines de nanomètres ? Les approches développées en début de thèse seront alors appliquées au cours des chapitres 3 et 4 pour analyser l'amplitude de l'OPO et du NZO et pour proposer des applications de ces mesures au sein du plan de contrôle overlay.

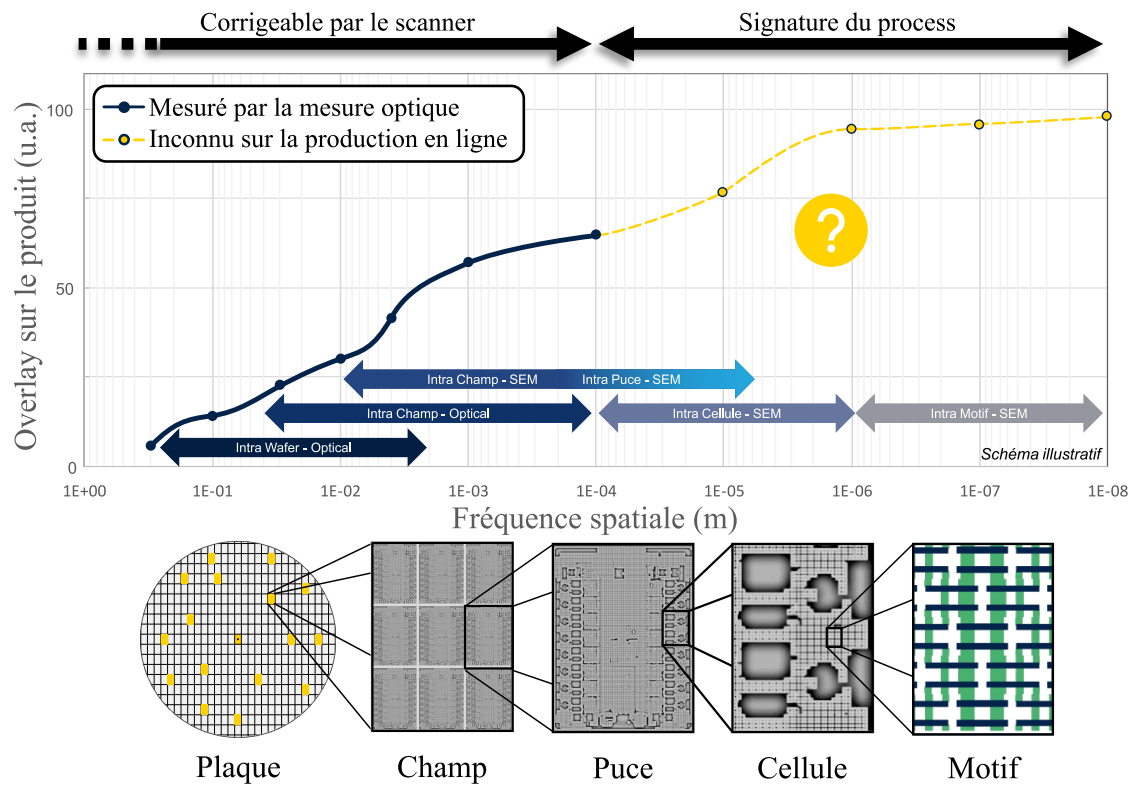


FIGURE 1.35 Décomposition fréquentielle de l'impact de la distribution de l'overlay. Adapté avec la permission de D. Slotboom [77]

Chapitre 2

Développement des dispositifs de mesures overlay SEM

Introduction de chapitre

Ce second chapitre présente de manière détaillée les dispositifs utilisés et développés pour l'obtention des résultats qui seront présentés dans les chapitres suivants.

La première partie se concentre sur les **dispositifs utilisés** dans le cadre de la thèse. Tout d'abord le principe de fonctionnement des SEM mis à disposition est abordé. Puis les différentes spécialisations de ces instruments (CD-SEM, HV-SEM, etc.) seront détaillées et leurs limites seront évoquées. Cette partie décrira ensuite la solution d'extraction de contours utilisée. Enfin nous concluons en détaillant l'infrastructure implémentée pour la génération d'images SEM synthétiques.

La suite du chapitre présente les **solutions développées** pour répondre à la problématique. Nous avons développé deux approches de mesure de l'overlay directe sur le produit. Ces deux approches complémentaires sont basées sur l'utilisation du *design* comme information préalable. Ceci permet la mesure même lorsque l'un des deux niveaux observés est partiellement masqué.

Finalement la dernière partie met en évidence certains **points d'intérêt et développements remarquables** de la mise en place de ces dispositifs : l'utilisation avancée d'un logiciel en développement, l'apport de la thèse dans la mise en place de l'infrastructure *ImageLab* au sein de STMicroelectronics et l'implémentation en Python d'un algorithme robuste.

2.1 Microscope électronique à balayage (MEB)

2.1.1 Principe de fonctionnement

Formation de l'image

Le Microscope Électronique à Balayage, aussi noté SEM pour *Scanning Electron Microscope*, permet l'observation de structures microscopiques avec une résolution inférieure au nanomètre en ayant des champs de vision (FoV) de l'ordre de la dizaine de micromètres. Contrairement à l'imagerie et à la microscopie optique, aucune image n'est formée directement dans un plan d'observation. Un faisceau d'électrons à haute énergie est concentré sur un point de quelques angströms sur la surface de l'échantillon [78]. Comme schématisé Figure 2.1, le faisceau est ensuite balayé sur l'échantillon de gauche à droite et de haut en bas afin de générer l'image. L'interaction du faisceau avec la surface émet différents électrons qui sont ensuite collectés par des capteurs dédiés. L'intensité en chacun des points balayés par le faisceau est alors convertie en une valeur numérique afin d'obtenir une image en niveaux de gris une fois l'ensemble de la surface d'intérêt inspectée. La surface est généralement balayée à plusieurs reprises afin de moyenniser plusieurs images pour améliorer le rapport signal sur bruit, on parle alors du nombre de *frames*.

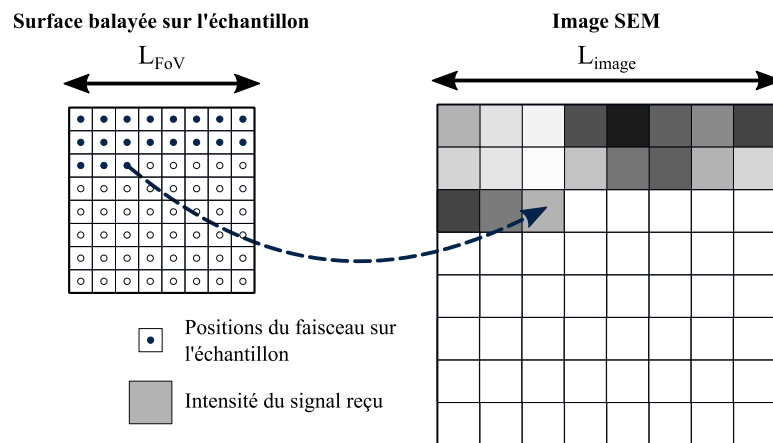


FIGURE 2.1 Schéma simplifié de formation de l'image SEM. L'intensité du signal obtenu en chaque point du balayage de la surface de l'échantillon est associée à une intensité en nuances de gris, formant l'image SEM finale. Adapté et traduit de [78, 79].

Interaction du faisceau avec l'échantillon

L'image renvoyée par le SEM représente l'ensemble des interactions électron-matière dans l'échantillon analysé, il est donc nécessaire de comprendre les mécanismes en jeu. Lorsque le faisceau primaire d'électrons interagit avec l'échantillon, les électrons perdent leur énergie via les interactions électromagnétiques avec les atomes et via les collisions avec la matière au sein d'un volume communément appelé *poire d'interaction*. La forme de cette poire, représentée Figure 2.2a, dépend de l'énergie du matériau et du faisceau. Sa profondeur augmente notamment avec l'énergie des électrons. Représentés Figure 2.2b, 3 types de particules et un rayonnement sont principalement émis par ces interactions [78] :

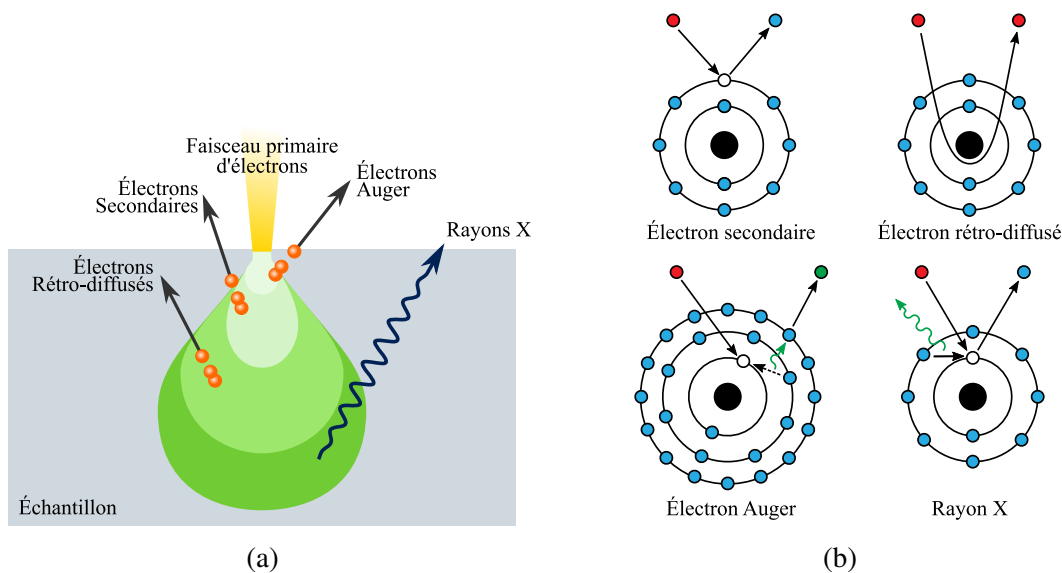


FIGURE 2.2 (a) Poire d'interaction entre les électrons incident et l'échantillon. (b) Mécanismes d'interactions électrons-échantillon intervenant à tous les niveaux. Adapté de [80].

Électrons secondaires (SE) : Ces électrons sont issus des collisions non élastiques entre les électrons primaires (incidents) et des électrons de la bande de conduction de l'échantillon. L'électron éjecté est appelé secondaire et possède une énergie inférieure à 50 eV. De par leur faible énergie, seuls les électrons secondaires émis en surface parviennent à s'échapper de l'échantillon (≈ 10 nm), ils apportent donc une information précise sur la topologie de l'échantillon. Ces électrons sont couramment utilisés pour leur bon rapport signal sur bruit ainsi que pour leur haute résolution. De plus, l'intensité du signal reçu dépend de l'angle entre le faisceau et la surface d'interaction ce qui permet de visualiser les changements de hauteurs [81]. Lorsque de fortes énergies sont utilisées pour le faisceau incident, d'autres types d'électrons

secondaires peuvent être générés (collision sur les parois) et peuvent introduire du bruit [79].

Électrons rétro-diffusés (BSE) : Ces électrons sont issus des interactions quasi élastiques entre les électrons primaires et les noyaux des atomes de l'échantillon. Ces électrons conservent une quantité importante de leur énergie initiale. Grâce à leur énergie plus élevée comprise entre 50 eV et 40 keV, ces électrons peuvent provenir de couches plus profondes de l'échantillon. Ils permettent aussi d'observer le contraste chimique : le nombre d'électrons BSE est relié au numéro atomique du matériau observé. Ces électrons sont utilisés principalement pour observer les couches enterrées et le fond de structures profondes.

Électrons Auger : Ces électrons sont issus d'une collision d'un électron primaire avec un électron des couches internes. L'éjection de cet électron interne entraîne la désexcitation d'un électron de couche supérieure qui perd son énergie sous forme d'un photon. Ce photon peut être réabsorbé par un électron de couche supérieure qui va lui aussi être éjecté en un électron Auger avec une très faible énergie. Ces électrons sont utilisés dans des SEM spécifiques dédiés à l'analyse de composition.

Rayons X : Lorsqu'un électron primaire rentre en collision avec un électron interne il est courant que le photon ne soit pas réabsorbé pour former un électron Auger. Dans ce cas, le photon sort du matériau avec une longueur d'onde dans les rayons X.

Composition d'un SEM

La Figure 2.3 schématise les principaux éléments d'un SEM [78, 80]. Un canon à électrons généralement composé de tungstène émet un faisceau d'électrons accélérés à l'énergie souhaitée. Pour un CD-SEM dédié à la mesure du CD, l'amplitude d'énergie varie entre 0.2 keV et 5 keV. Dans le cas d'un High-Voltage Scanning Electron Microscope (HV-SEM), ces tensions peuvent atteindre 50 keV [61]. Une fois accéléré, le faisceau est concentré en un seul point de focal d'un diamètre compris entre 0.4 nm et 5 nm à l'aide d'un ou de deux condenseurs. Les bobines de balayages permettent alors de déplacer ce point de focal dans le plan de l'échantillon de façon à balayer la surface. Différents détecteurs permettent de récupérer les électrons issus de l'interaction entre l'échantillon et le faisceau incident. Les SEM couramment utilisés pour la métrologie en ligne dans l'industrie micro-électronique possèdent des capteurs dédiés aux électrons SE et BSE, connus sous le nom de détecteurs de Everhart-Thornley. En ajustant le potentiel sur leur grille extérieure, il est par ailleurs possible d'attirer à la fois les SE et les BSE en y appliquant une tension positive d'environ

250 V ou de filtrer uniquement les BSE à l'aide d'une tension négative (environ -50 V). Les SE, ayant une énergie inférieure à 50 eV, sont repoussés par un tel potentiel.

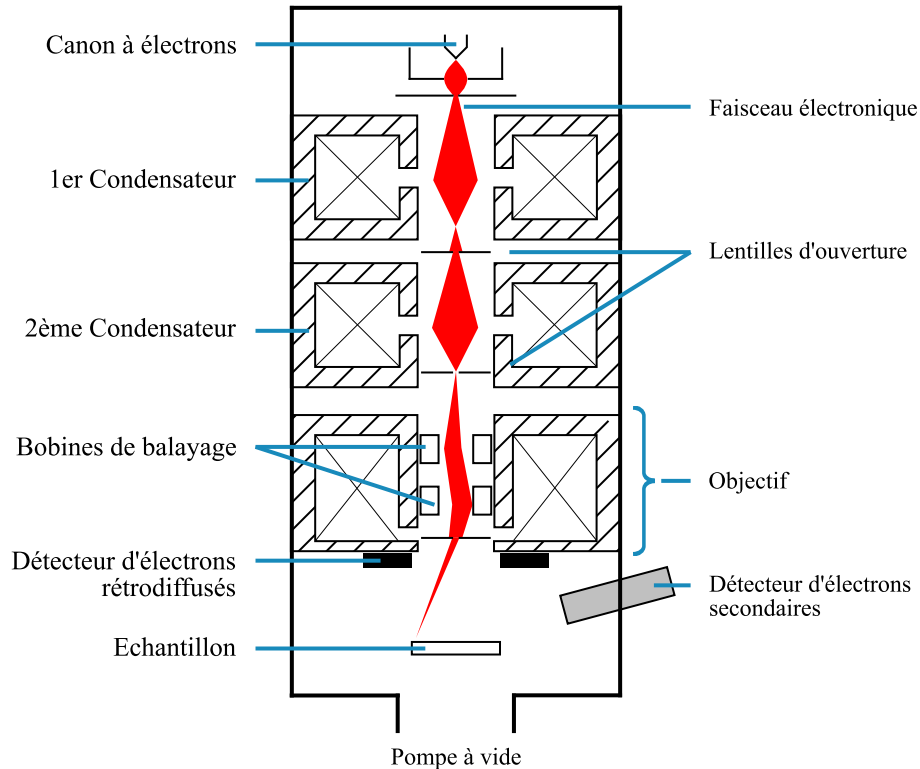


FIGURE 2.3 Schéma simplifié d'un microscope électronique à balayage (SEM). Adapté de [78, 80].

Contrairement à la microscopie optique, le changement de grandissement n'est pas réalisé par un changement dans la colonne "optique". Le grandissement M est historiquement défini comme le ratio entre la longueur de l'image à l'écran L_{image} et la longueur de l'image scannée L_{FOV} : $M = L_{image}/L_{FOV}$. La taille de l'image à l'écran est fixée historiquement par l'écran d'affichage de l'écran cathodique [78]. Une amplitude de balayage plus grande induira un grandissement plus faible. Le nombre de positions du faisceau enregistrées sur l'échantillon va avoir un impact sur la résolution et sur le temps de la mesure. La taille des pixels D_{PE} correspond au pas de déplacement du faisceau (cf. Figure 2.1) et est calculée comme le rapport entre la longueur scannée L_{FOV} et le nombre de pixels N_{PE} . L'équation 2.1 relie ces derniers paramètres, où L_{image} est une constante du SEM. Une condition classique d'utilisation en ligne du CD-SEM correspond à un grandissement de 100 000 pour 1024x1024 pixels. Avec un L_{image} fixé à 13.5 cm, l'image SEM possède alors une taille de pixel d'environ 1.32 nm et un L_{FOV} de 1.35 μm .

$$D_{PE} = \frac{L_{FoV}}{N_{PE}} = \frac{M}{L_{image} \times N_{PE}} \quad (2.1)$$

2.1.2 Limitations du SEM

Plusieurs limitations du SEM sont à prendre en compte pour l'analyse des images. Cinq d'entre elles ont particulièrement un impact sur les travaux de la thèse :

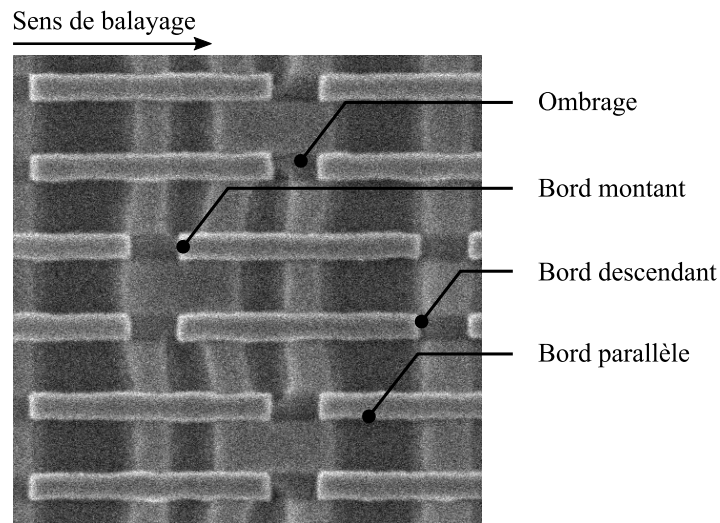


FIGURE 2.4 Effet du sens de balayage et de l'ombrage sur l'image SEM.

Bruit de grenaille : Le faisceau d'électron est formé d'un nombre fini de particules. Pour de faibles courants, la fluctuation aléatoire du nombre d'électrons autour de la moyenne n'est plus négligeable et ce bruit blanc est transféré sur l'image d'intensité reçue par les capteurs [82, 83].

Effet de charge électrique : L'électrisation de l'échantillon ou de la zone balayée induit un déplacement des électrons du faisceau et de l'image. Celui-ci se traduit par une image floue. Le balayage du faisceau a tendance à charger la zone de l'échantillon mesuré. Pour mitiger cet effet il est possible de réduire le courant et la tension du faisceau ou d'augmenter la vitesse de balayage et de réduire le nombre de passages. D'autres types de balayages non conventionnels réduisent aussi l'électrisation, en entrelaçant les lignes de balayages par exemple [84]. Une électrisation de l'ensemble de la plaque peut aussi être induit par d'autres procédés comme la lithographie [85].

Sens de scan et ombrage : Illustré Figure 2.4, lors du balayage unidirectionnel du faisceau les bords montants reçoivent une quantité d'électrons plus importante que les

bords descendants. Ces premiers sont généralement mieux définis. Les bords parallèles au sens de balayage montrent quant à eux d'une résolution réduite. Par ailleurs un effet d'ombrage derrière un motif surélevé peut apparaître. Lors du passage du faisceau, des charges induites sur les motifs sur-élevés génèrent un champ électrique qui va "collecter" les électrons secondaires des pixels suivants [79]. Des balayages alternatifs associant des lignes verticales et horizontales ou alternant le sens de balayage permettent de mitiger ces effets.

Impact destructif : Le faisceau d'électron peut avoir un effet destructeur sur l'échantillon observé. C'est notamment le cas après lithographie où la résine est rétrécie (on parle de *shrinkage*) [86, 87]. Cela peut aussi être le cas après gravure, pour cela les mesures sont généralement réalisées sur des mires dédiées ou sur des plaques de contrôle en attendant de démontrer la non-destructivité.

Distorsions : Des distorsions sur l'image peuvent apparaître à cause des défauts du système de balayage. Le balayage est géré par deux systèmes de bobines distincts pour l'horizontal et pour la verticale. Une non-orthogonalité entre ces deux systèmes peut générer du cisaillement, tandis qu'une non-linéarité du balayage entraînera une déformation des bords de l'image. La vitesse de balayage tend à diminuer sur les bords d'image, les motifs observés apparaissent alors étirés [78].

2.1.3 Équipements à disposition

Les travaux de thèse s'appuient principalement sur les outils de production de STMicroelectronics Crolles. Le département de métrologie dispose de CD-SEM Hitachi dédiés à la mesure du CD en ligne. Plusieurs générations co-existent mais seuls les SEM les plus récents seront utilisés : les Hitachi CG5000. Ces SEM atteignent des tensions d'accélération de 5 kV, avec des capteurs BSE qui ne sont à ce jour pas qualifiés. La recette utilisée pour la prise d'image SEM sera la plus proche possible de la recette de mesure en ligne post-gravure :

TABLE 2.1 Paramètres de la recette SEM de référence post-gravure.

V_{acc} (V)	I_p (pA)	Scan	# frames	FoV ($\mu m \times \mu m$)	Résolution image	Pixel (nm)
800	8,0	TV (30 fps)	32	1,35×1,35	1024×1024	1,32

La recette de référence est adaptée selon le besoin. En particulier pour une inspection post-lithographie la tension d'accélération est abaissée à 300 V tandis que le FoV peut être augmenté au détriment de la taille du pixel. Seuls les capteurs SE sont utilisés, ainsi que le mode haute résolution (HR).

Le CEA-Leti dispose quant à lui d'un CD-SEM d'Applied Materials, le Verity 6i, qui est plus polyvalent. Il dispose de capteurs BSE qualifiés ainsi que de tensions d'accélération allant jusqu'à 15 kV.

À noter que STMicroelectronics dispose d'autres SEM qui peuvent être utilisés, mais avec plus de contraintes. Le KLA eSL10 appartient au département de défektivité et propose des tensions allant jusqu'à 25 kV ainsi qu'un débit de prise d'image bien supérieur, mais n'est pas dédié à la mesure ce qui complique son utilisation. De plus, en 2023, deux nouveaux Verity similaires à celui du CEA-Leti sont arrivés à STMicroelectronics ce qui offre une nouvelle opportunité d'utilisation des capteurs BSE. Leur accès est cependant priorisé pour la production.

2.1.4 Extraction de contours

Une fois l'image SEM obtenue, la mesure est réalisée *via* la détection des bords des motifs d'intérêt. L'extraction de contour est effectuée en 3 étapes : (1) génération d'une *seed*, (2) placement de jauges et (3) extraction du contour. La Figure 2.5 représente ces étapes dans le cas d'une extraction à partir d'un *layout* de référence.

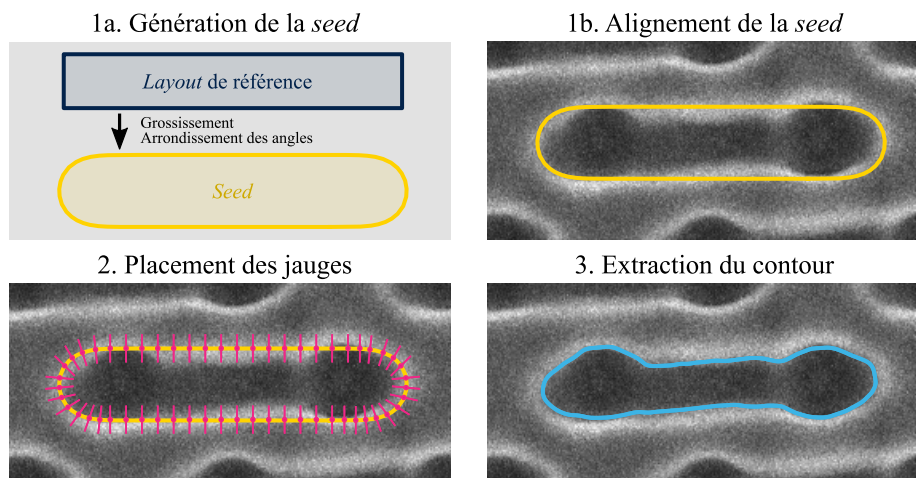


FIGURE 2.5 L'extraction de contours SEM se fait en 3 étapes majeures : la génération d'un pré-contour dit *seed*, le placement de jauges et l'extraction du contour suivant les jauges.

Génération d'une *seed*

La première étape consiste à obtenir un pré-contour dit *seed* sur lequel sont placées des jauges pour pouvoir extraire un contour précis. Deux stratégies existent et se complètent : la génération de la *seed* depuis l'image ou l'utilisation d'un *layout* de référence.

La *seed* peut être générée directement sur l'image SEM à partir d'opération de traitement d'image classiques (seuil de niveau de gris, convolutions, filtre de Canny [88]) ou encore en utilisant des méthodes issues de l'intelligence artificielle (segmentation, arbres de décision [89, 90]). Dans ce-cas là, l'étape 1b. de la Figure 2.5 n'est pas nécessaire et la *seed* générée est déjà alignée par création avec le motif de l'image SEM.

Pour d'autres cas plus complexes, la *seed* peut être obtenue à partir d'un *layout* de référence connu. Illustrée Figure 2.5, la génération de la *seed* est alors réalisée en deux sous-étapes. Tout d'abord, soit le *layout* de référence est déjà parfaitement similaire au motif observé et il peut être utilisé directement comme *seed*, soit des transformations mineures telles qu'un grandissement et l'arrondissement de ses angles sont effectuées. L'étape suivante (1b) consiste à aligner cette nouvelle *seed* avec le motif de l'image SEM. La *seed*, un polygone représenté par ses nœuds et arêtes, est alors transformée en une matrice de pixels. On parle de rasterisation. Cette image de la *seed* est alors alignée avec le motif sur l'image SEM à l'aide d'algorithmes classiques tels que la cross-corrélation [91]. Cette méthode d'extraction de contours basée sur un *layout* est particulièrement efficace pour l'extraction de motifs 2D appartenant à plusieurs niveaux différents et sera utilisée dans les travaux de thèse.

Placement de jauges

La seconde étape consiste à placer des jauges normales à la *seed* afin de pouvoir analyser les profils de niveaux de gris perpendiculairement aux bords du motif, tel que sur la Figure 2.5-2. Plusieurs paramètres ont une influence sur le contour extrait :

- ✧ Le **pas de détection** consiste à définir l'écart entre deux jauges. Il est généralement égal à la taille des pixels de l'image ;
- ✧ La **longueur des jauges** consiste à définir l'espace inspecté autour de la *seed* pour trouver le contour. Des jauges trop longues risquent de détecter le bord d'un autre motif tandis qu'une jauge trop courte peut mener à une détection de bord incomplète ;
- ✧ Un **filtre longitudinal** (nommé *filter width*) consiste à appliquer un filtre gaussien le long de la *seed* afin de lisser les irrégularités ;
- ✧ Un **filtre orthogonal** (nommé *filter width orthogonal*) consiste à appliquer un filtre gaussien le long des jauges afin d'améliorer la robustesse au bruit.

Extraction du contour

La méthode la plus couramment utilisée de détection de bords se base sur un seuil de niveau de gris sur l'image. La méthode est illustrée Figure 2.6 : le long de chaque jauge les valeurs du minimum et du maximum du niveau de gris sont détectées, puis le point d'intensité

égal à $min + 80\%$ est sélectionné comme bord probable du motif [92]. La valeur de seuil influence la hauteur de mesure : 80% permet de mesurer le haut du motif, tandis que 20% donnera le bas et 50% le milieu.

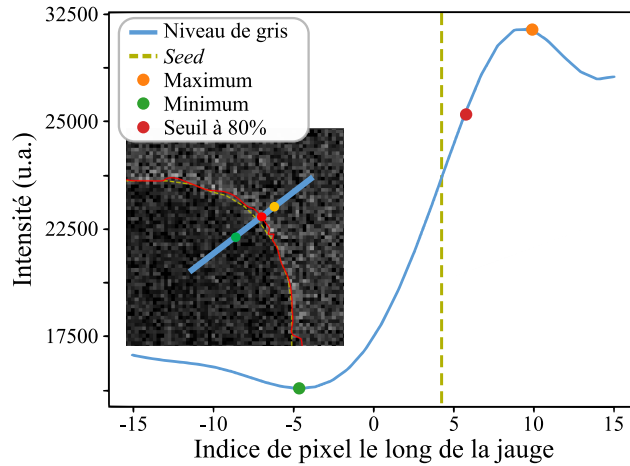


FIGURE 2.6 Les contours des motifs peuvent être détectés comme l'ensemble des pixels ayant une intensité égale à $min + 80\%$ le long des jauges placées sur la *seed* [92].

Le logiciel d'extraction de contour "SIMPL" développé par ASELTANanographics, utilisé dans le cadre de cette thèse, propose une alternative plus robuste. L'extraction de contour repose sur l'utilisation d'un modèle. Celui-ci est calibré sur une image de référence afin d'en déduire une signature caractéristique de la topographie sur l'image. L'utilisation du modèle permet ainsi de prendre en compte une partie plus importante des informations contenues dans l'image et notamment les conditions d'imagerie, le contraste des matériaux ou encore les effets d'ombrage. De manière analogue à la valeur de seuil, le choix de la méthode de détection permet de définir le placement du contour. En prenant le minimum et le maximum du signal le contour sera placé sur le bas et le haut du motif, tandis que le maximum de la dérivée donnera un placement plus robuste autour des 80% à l'intérieur ou à l'extérieur du motif. Des travaux effectués par F. Weisbuch en 2021 démontre une correspondance possible entre les mesures CD-SEM de référence et celles obtenues par ces algorithmes innovants [93].

2.1.5 Images SEM synthétiques

Les images SEM synthétiques, c'est-à-dire simulées, ont de nombreuses applications. Leur usage est fréquent pour calibrer des modèles de mesure SEM ou pour prédire le comportement d'une mire de mesure [94–97]. Dans le cadre de la thèse, ces images serviront de référence où de l'overlay connu sera programmé afin d'évaluer les performances du nouvel

algorithme de mesure (Section 3.1). Ainsi la variabilité de la mesure peut être dissociée de la variabilité du procédé de fabrication.

Les algorithmes de simulation d’images synthétiques se répartissent en deux groupes : les modèles rigoureux et les modèles compacts dont les modèles à réseau de neurones. Les premiers sont basés sur des simulations physiques de la trajectoire et de l’énergie de tous les électrons incidents et générés. Des méthodes de Monte Carlo simulent statistiquement les interactions entre chaque électron et l’échantillon [98–100]. Ces modèles sont polyvalents et précis, cependant leur temps de calcul est très long. Kieft *et al* reportent des durées allant jusqu’à la semaine pour des simulations à haute énergie [101]. Les modèles compacts sont quant à eux des modèles mathématiques calibrés sur de vraies images SEM ou sur des images provenant de modèles rigoureux [101–103]. Ces derniers ont l’avantage d’être très rapides au prix d’une gamme d’utilisation restreinte et d’une précision inférieure.

Plus récemment, Verduin *et al* sont parvenus à accélérer sur GPU des simulateurs Monte-Carlo utilisant des modèles semi-empiriques pour gérer les collisions électrons - matière [104]. Les gains de temps sont considérables comme le montre la Table 2.2. Sur cette base, L. van Kessel et C.W. Hagen proposent en 2020 un simulateur Monte Carlo accéléré sur GPU nommé “Nebula” [105].

TABLE 2.2 L’accélération sur Graphics Processing Unit de la simulation d’images SEM synthétique permet des gains de temps considérables. Les simulations sur CPU proviennent des travaux de Kieft *et al.* [101], ceux sur GPU sans Nebula de Verduin *et al.* [104] tandis que l’accélération sur plusieurs cœurs de CPU a été réalisée par Zou *et al.* [106]. Tableau issu de L. van Kessel et C.W. Hagen [105].

Energie faisceau	CPU - 1 coeur [101]	GPU [104]	Gain
5 keV	2s 5j 12h	32 m	894×
3 keV	1s 4j 20h	22 m	796×
1 keV	3j 11h	10 m	538×
800 eV	2j 17h	8 m	530×
500 eV	1j 10h	5 m	472×
300 eV	15h16m	3 m	387×
Energie faisceau	CPU - 10 coeurs [106]	Nebula sur GPU [105]	Gain
3 keV	2h	90 s	80×

Ce simulateur sera utilisé dans le cadre de la thèse pour la génération d’image SEM. La publication de 2020 détaille les hypothèses et les modèles physiques implémentés [105] :

- ✧ Les électrons sont considérés comme des particules classiques ;
- ✧ Les électrons ont des interactions discrètes avec l’échantillon ;

- ✧ Les électrons peuvent être traités indépendamment les uns des autres ;
- ✧ Trois types d'interactions sont pris en comptes : les collisions élastiques et non élastiques au sein du matériau ainsi que les interactions au sein des interfaces entre les matériaux ;
- ✧ Les modèles utilisés sont rigoureux, hormis un modèle semi-empirique gérant les collisions inélastiques et les interfaces entre les matériaux [101].

Quelques limitations sont tout de même à relever. Tout d'abord, les électrons étant simulés séparément, les effets de charge ne sont pas considérés. De plus, la nature ondulatoire des électrons n'est pas prise en compte donc les effets de diffraction ne peuvent pas être simulés. Enfin les électrons Auger et les rayons X ne sont pas simulés à ce jour.



Une étape majeure du manuscrit est atteinte ici. À partir de cette note et pour la suite du manuscrit, les résultats présentés sont directement issus de travaux dans la cadre de la thèse où j'ai eu un impact significatif.

Le logiciel Nebula est conçu pour être modulaire et nécessite la mise en place d'une infrastructure supplémentaire adaptée à l'usage. Suivant les recommandations des auteurs, nous l'avons mise en place en Python au sein du laboratoire. La Figure 2.7 illustre les principales étapes de génération d'images SEM.

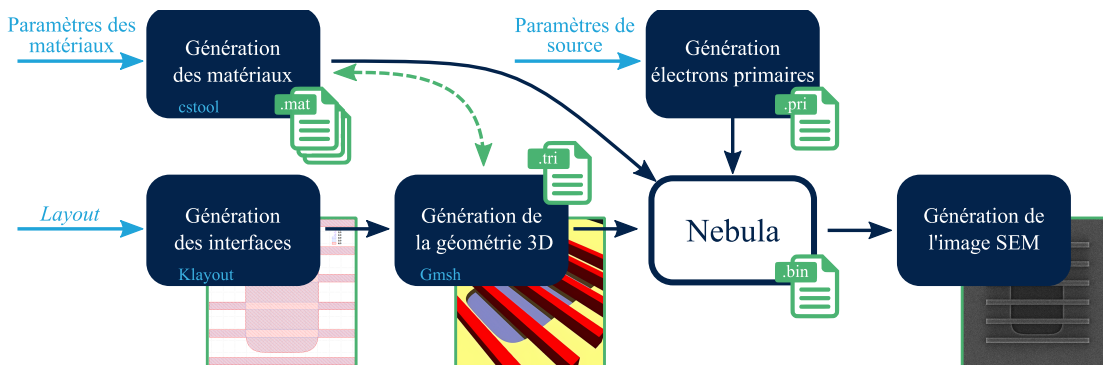


FIGURE 2.7 Étapes principales du processus de génération d'images SEM synthétiques à l'aide de Nebula.

Nebula prend trois fichiers en entrée :

1. La **source primaire d'électrons (.pri)** consiste en une liste explicite des électrons incidents. Elle est contenue dans un fichier *.pri* avec leur position initiale, leur angle et leur énergie. Un générateur de source a été généré en interne, afin d'uniformiser la nomenclature des fichiers, ces derniers étant lourds (quelques gigaoctets) et pouvant être réutilisés.

2. Les **fichiers matériaux (.mat)** contiennent les informations décrivant les probabilités d'interaction des électrons avec le matériau pour les différentes interactions considérées. Le logiciel `cstool`, fourni avec Nebula, calcule pour chacun des matériaux la section efficace et compile les résultats dans des fichiers `.mat` uniques à chaque matériau. Ces fichiers sont réutilisés pour les différentes simulations.
3. La **géométrie de l'échantillon (.tri)** consiste en une liste de triangles qui forment le maillage des interfaces entre deux matériaux. Le détecteur est inclus dans ce fichier. Nous avons développé deux scripts Python pour générer ce dernier. Tout d'abord un *layout* à deux niveaux est manipulé à l'aide de la librairie de KLayout afin de générer des niveaux correspondant aux diverses interfaces [107]. Ensuite la librairie Python de Gmsh est utilisée pour générer les maillages et définir les matériaux aux différentes interfaces à partir du *layout* précédent [108]. Le contenu de ces différents scripts doit être adapté selon l'empilement simulé, la structure reste cependant similaire. L'utilisation de l'outil libre de droit OpenCASCADE pour la génération d'empilements plus complexes est envisagée dans le futur [109].

Le logiciel renvoie un fichier binaire en sortie, noté `.bin`. Celui-ci contient dans un format similaire au fichier `.pri` l'ensemble des électrons perçus par le détecteur. Un court script Python vient alors transformer cette information en une image au format `.tiff`, sans compression. D'autres post-traitements peuvent être envisagés, tels que le rajout de la simulation des détecteurs Everhart–Thornley évoqués Section 2.1 ou encore l'ajout de bruit et de distorsions sur l'image SEM finale.

Les images générées dans le cadre de cette thèse forment la première application de Nebula au sein du laboratoire. La Figure 2.8 montre deux exemples d'images SEM simulées à l'aide de l'infrastructure mise en place.

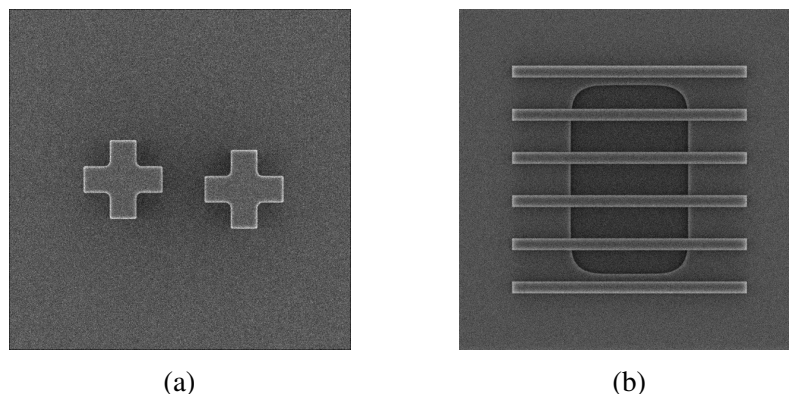


FIGURE 2.8 L'implémentation de Nebula au sein d'une infrastructure personnalisée permet de simuler différents empilements plus ou moins complexes.

Après optimisation des temps de transfert des fichiers d'entrées et en parallélisant sur 4 GPU nous obtenons de très bonnes performances : pour ces images de 1024x1024 pixels à 800 eV le temps moyen de calcul est de 27 s par image.

La Figure 2.8b a été générée via l'empilement représenté Figure 2.9. Quelques simplification vis-a-vis de l'empilement réel ont été réalisées. L'objectif est en effet d'obtenir une simulation suffisamment rigoureuse pour donner des images représentatives de vraies images SEM, tout en maintenant une complexité relativement faible. En particulier, l'oxyde de grille n'a pas été simulé : à faible tension seuls les électrons secondaires générés sur la surface (10 nm) sont captés. Simuler la grille comme une couche d'oxyde de la même hauteur que la marche a grandement simplifié l'implémentation en Python. Pour obtenir un contraste similaire aux images SEM, la fine couche d'oxyde natif a dû être rajoutée. Cependant l'oxyde natif n'a pas été simulé sur les bords verticaux. Sur les bords, l'intensité du signal est dominée par la topologie et non par le contraste chimique, l'ajout d'oxyde natif vertical aurait donc rajouté beaucoup de complexité dans le script sans pour autant faire une réelle différence sur la simulation. Cet empilement sera utilisé dans la suite de la thèse, en particulier dans le Chapitre 3.

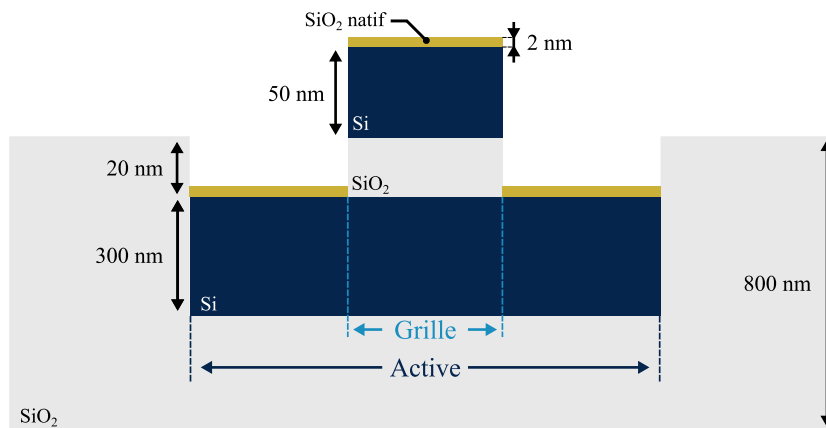


FIGURE 2.9 Schéma de l'empilement utilisé pour la simulation des images SEM bi-niveaux.

L'essentiel

Le Microscope Électronique à Balayage est un dispositif crucial dans les travaux de cette thèse. Trois points principaux sont à retenir de cette section :

1. Les **images SEM** sont réalisées via le balayage d'un faisceau d'électrons sur la surface de l'échantillon. Ce mécanisme complexe entraîne certaines limitations importantes à prendre en compte : distorsions, ombrages, impact du sens de balayage, destructivité.
2. **Deux types d'électrons** nous intéressent particulièrement :
 - ✧ Les électrons secondaires (SE) de haute résolution pour la topologie de la surface ;
 - ✧ Les électrons rétro-diffusés (BSE) de plus faible résolution pour l'observation de couches profondes.
3. L'**extraction de contour** sera utilisée sur ces images pour faire de la mesure OVL. Pour cela, une solution commerciale basée la calibration d'un modèle sera utilisée.
4. Des **images synthétiques** seront utilisées dans le Chapitre 3 comme images de référence pour la caractérisation des performances des outils de mesures. Celles-ci sont générées à l'aide d'un simulateur semi-empiriques open-source nommé Nebula.

La prochaine section détaille les solutions développées à partir de ces dispositifs pour répondre aux problématiques de la thèse.

2.2 Solutions développées de métrologie de l'overlay sur le produit

L'analyse des moyens à disposition et de l'état de l'art sur la mesure de l'overlay *On Product* a rapidement mis en évidence le besoin de développer une approche innovante de la mesure SEM-OVL pour répondre au premier objectif de la thèse évoqué Section 1.4.2 : est-il possible, avec les outils et équipements disponibles à STMicroelectronics, de réaliser de la métrologie SEM-OVL directe sur le produit, sans mire dédiée ?

Pour cela un premier cahier des charges des objectifs et des contraintes a été réalisé. Puis une méthode de mesure innovante, basée sur le Barycentre d'une Référence Réalignée (BRR) a été développée au cours de la première année de thèse. Cette section présentera en

complément une seconde approche de la mesure de l'overlay, basée sur le Barycentre du Contour Extrait (BCE), utilisée pour les cas moins complexes.

2.2.1 Objectifs et contraintes

1. Utilisation des équipements de production de STMicroelectronics

L'un des objectifs est d'améliorer les capacités de mesure des équipements actuellement à disposition. Les SEM de production, Hitachi CG5000, seront donc utilisés et seront associés à la solution d'extraction de contour d'ASELTA Nanographics. Les spécificités de ces SEM ont été détaillées Section 2.1.3. Seuls les capteurs SE, sensibles à la topologie, seront utilisés dans un premier temps. La solution devra cependant être compatible avec les futures évolutions du parc d'équipement.

2. Robustesse aux motifs 2D partiellement masqués

L'absence de mire dédiée complique la mesure. Elle doit être non destructive et sera alors effectuée post-gravure et avec des faibles tensions d'accélération. De plus, les motifs de la puce ne sont pas optimisés pour la métrologie : ils sont généralement en 2 dimensions (2D), possiblement courbes, et sont superposés entre différents niveaux pour assurer la fonction du circuit (voir Section 1.1). Les capteurs SE utilisés par les SEM de production ne sont sensibles qu'à la topologie de la surface, l'approche développée doit donc être robuste aux motifs partiellement masqués tels que sur la Figure 2.10. Ici les grilles, métalliques, sont positionnées sur les zones actives pour former les transistors. Les parties sous les grilles sont alors masquées par ces dernières ce qui peut perturber la mesure overlay.

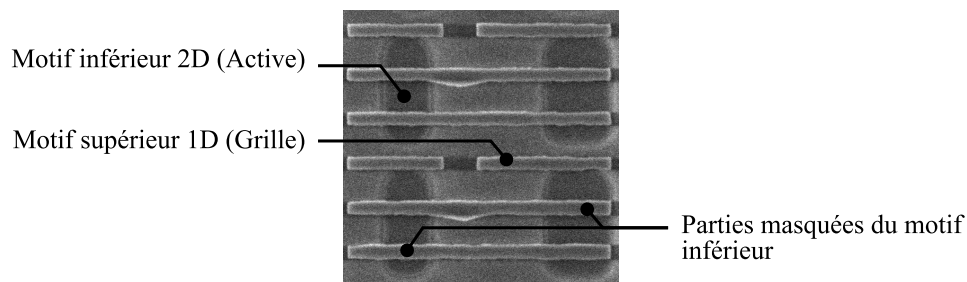


FIGURE 2.10 Cas de mesure de l'overlay directe sur le produit sur des motifs 2D partiellement masqués après gravure.

3. Méthode industrialisable

L'objectif est de mettre en place une méthode qui puisse être mise en production. L'algorithme de mesure doit pouvoir être optimisé pour ne pas ajouter de temps significatif à la prise d'image. De plus, la création de la recette de mesure doit être réalisable dans un temps similaire à celle de la recette SEM (≈ 30 min).

Évaluation des performances

La méthode développée sera évaluée via des corrélations avec des mesures de référence. Celles-ci proviendront de mesures effectuées par des équipements de métrologie overlay en ligne tel que l'ARCHER 600 (IBO) disponible à STMicroelectronics ou encore à l'aide d'overlay programmé sur des images SEM synthétiques.

Cinq métriques nous intéresseront principalement lors de ces corrélations : le coefficient de corrélation (r^2), la pente, le biais, le *Root Mean Square* (RMS) et le *Net Residual Error* (NRE). Lorsque les mesures de référence sont certaines, comme lors de corrélation avec des images synthétiques, nous utiliserons la métrique RMS. Cette métrique correspond à 3σ de l'écart à la valeur de référence. Lorsque appliquée à un grand nombre de mesure dont la distribution est supposée gaussienne, cette métrique permet d'estimer l'incertitude de mesure dans un intervalle de confiance supérieur à 99%. A noter que cette incertitude ne prend pas en compte le TIS (cf. page 20) qui est généralement compris pour les mesures overlay. Le NRE est quant à lui défini comme le $3\sigma/\sqrt{2}$ de l'écart à la régression linéaire, σ désignant l'écart-type. Cette métrique évalue l'écart entre les mesures, tout en attribuant l'erreur aux deux techniques grâce au terme $\sqrt{2}$. Au contraire du r^2 , le NRE est indépendant de l'intervalle sur lequel la corrélation est faite. Inoue *et al.* obtiennent des valeurs de NRE comprises entre 1 nm et 3 nm pour des mesures d'OVL sur des mires dédiées proches de celle de la mesure optique de référence [62, 64]. Nous nous attendons à des valeurs dans cet ordre de grandeur, voire supérieures : l'absence de mire dédiée et les distances entre les mires de référence et les points de mesure détériorent la corrélation.

Mesurer de l'overlay sur le produit entraîne une seconde difficulté pour la corrélation avec les mesures de référence. L'overlay varie spatialement sur la plaque, deux mesures espacées de quelques millimètres donneront naturellement des valeurs légèrement distinctes. Pour atténuer cet effet, il est possible de modéliser l'overlay sur la plaque tel qu'abordé Section 1.2.3. Une fois qu'un modèle mathématique est ajusté sur les mesures de référence, il est possible de calculer la valeur prédite par ce modèle en la position de la mesure. La mesure donnée par la technique évaluée est alors corrélée avec la valeur prédite par le modèle. Cette méthode sera appliquée et détaillée Chapitre 3, Section 3.3.2 page 95.

2.2.2 Mesure basée sur le Barycentre d'une Référence Réalignée (BRR)

Le principe de fonctionnement de l'approche développée dans le cadre de la thèse est schématisé de manière simplifiée Figure 2.11 et de manière plus détaillée Figure 2.12. La mesure de l'OVL basée sur le Barycentre d'une Référence Réalignée (BRR) est composée de 4 étapes principales :

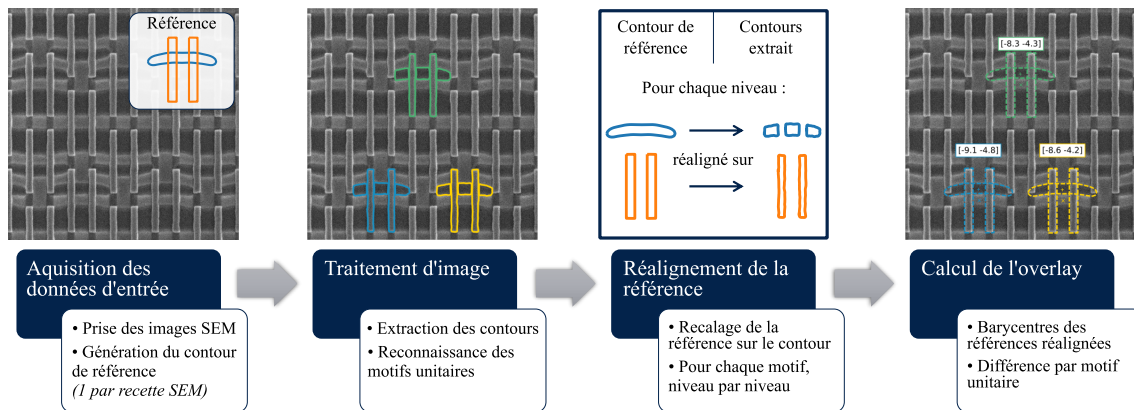


FIGURE 2.11 Principe de la mesure de l'overlay SEM basée sur le Barycentre d'une Référence Réalignée [110].

- 1. Acquisition des données d'entrée** : La recette SEM est créée et les images correspondantes acquises. Pour chaque recette SEM ou motif observé, un contour de référence est généré à partir du *design*, de contours moyens ou de simulations provenant de l'équipe OPC. Ce contour de référence a deux fonctions : il aide à l'extraction de contours bi-niveaux et permet la mesure de l'overlay sur le motif sélectionné (étape 3).
- 2. Traitement des images SEM** : À l'aide du contour de référence, les contours de l'image SEM sont extraits. Puis, les occurrences des motifs de référence sur l'image sont détectées à l'aide de méthodes de traitement d'image classiques (cross-corrélation). Ces différents motifs unitaires sont ensuite traités séparément, motif par motif.
- 3. Réalignement de la référence** : Cette étape est clé. Pour chaque occurrence, le niveau inférieur et supérieur sur l'image (cf définition OVL Section 1.2.1) sont traités indépendamment. Pour chaque niveau, la référence est réalignée sur le contour extrait. Cette étape a deux intérêts majeurs : (1) elle lisse la rugosité et le bruit du SEM et (2) elle permet de prendre en compte la partie masquée du motif inférieur. Cela est particulièrement visible sur la Figure 2.11. Le "haricot" du niveau inférieur (bleu) est partiellement masqué par les grilles du niveau supérieur (orange). La prise en compte de ces parties courbes sous les grilles, manquantes sur le contour extrait, est permise

par le réalignement de la référence. Cette étape est effectuée par des algorithmes dits de recalage, *registration* en anglais. Ces algorithmes, développés pour la vision par ordinateurs et détaillés dans la Section 3.1.1, permettent un réalignement très précis et robuste.

4. Calcul de l'overlay : L'overlay est ensuite calculé à partir des positions des barycentres des références réalignées. La valeur de l'overlay, conformément à la définition, est calculée comme le vecteur allant du barycentre du motif supérieur vers le barycentre du motif inférieur. Pour prendre en compte les cas où le motif observé n'est pas symétrique, la valeur de ce vecteur sur le contour de référence avant recalage est retranchée à l'overlay calculé (procédure détaillée Figure 2.13).

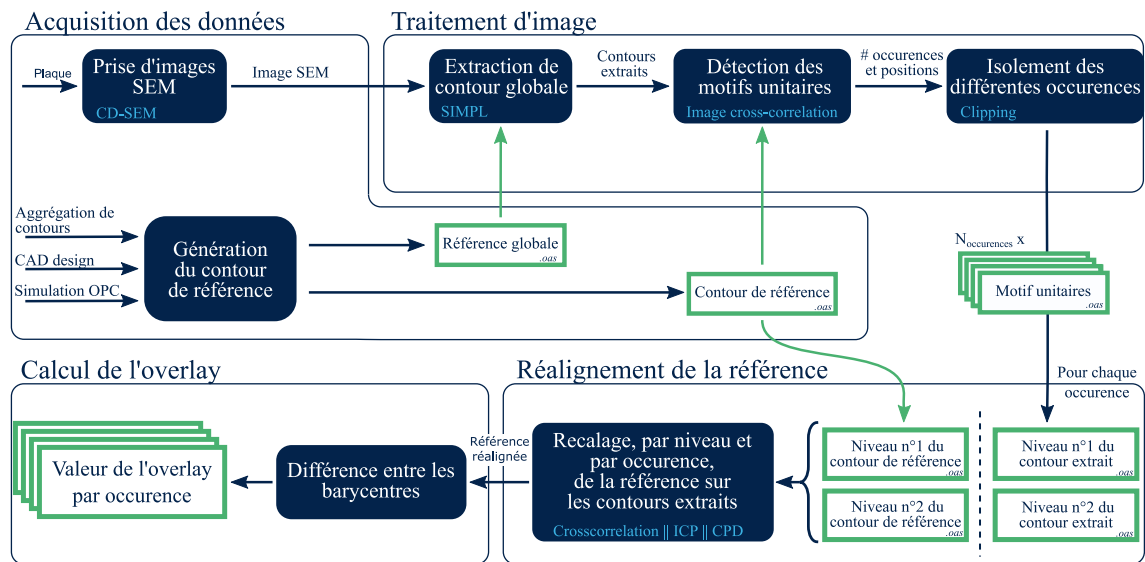


FIGURE 2.12 Processus détaillé de la mesure BRR

L'algorithme BRR a fait l'objet d'une demande de brevet au sein de STMicroelectronics. Ce type d'invention est cependant difficilement brevetable : il est presque impossible de démontrer l'utilisation de l'algorithme par un tiers. Une valorisation interne à STMicroelectronics a aussi été évaluée, mais aurait empêché la publication. La demande a donc été arrêtée au stade d'"invention".

2.2.3 Mesure basée sur le Barycentre du Contour Extrait (BCE)

Une seconde approche a été développée au cours de la thèse pour les cas plus simples où les deux niveaux sont parfaitement visibles sur l'image SEM. Cette technique consiste à une simple application de l'étape 4 de l'algorithme BRR sur les contours extraits, tel qu'illustré

Figure 2.13. Après l'extraction de contour, le vecteur de position de référence allant du barycentre du motif supérieur au motif inférieur est retranché au vecteur position issu des contours extraits. De par sa faible complexité, BCE est plus rapide et a pu être implémentée sur les mesures en ligne de la production.

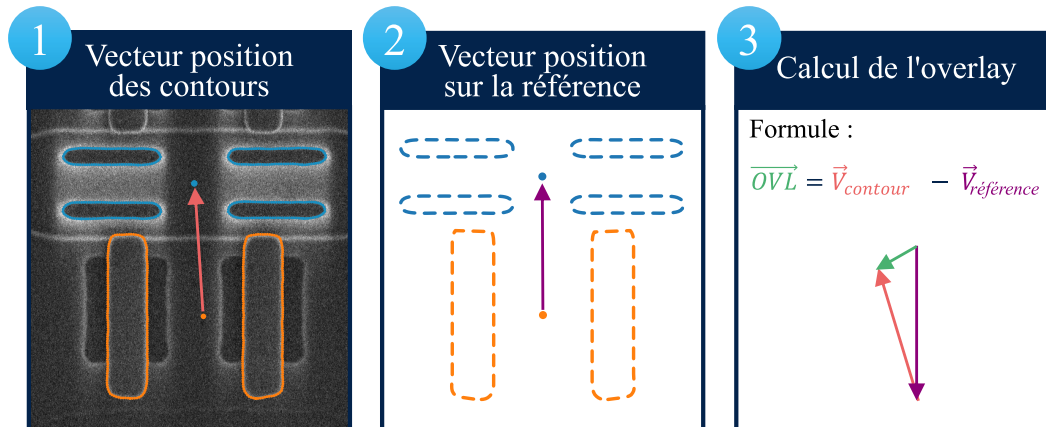


FIGURE 2.13 Schéma de la mesure overlay SEM par Barycentre du Contour Extrait.

L'essentiel

Pour permettre la mesure de l'On-Product Overlay (OPO) avec les équipements actuellement disponibles à STMicroelectronics, **une méthode basée sur l'extraction de contour a été développée**. Cette solution, nommée BRR, fonctionne via le recalage d'une référence sur les contours extraits. Elle répond aux contraintes établies :

- ✧ Utilisation des SEM de production (Faible tensions, détecteurs SE uniquement) ;
- ✧ Robuste aux motifs 2D partiellement masqués ;
- ✧ Déployable à l'échelle industrielle ;

Une seconde méthode (BCE) a été développée pour les cas les plus simples où les deux niveaux sont entièrement visibles.

Le développement de l'algorithme BRR et la mise en place de la méthode BCE sur les mesures SEM en ligne ont demandé de nombreux développements. La prochaine section explicitera les défis rencontrés : l'ajout de fonctionnalités à un logiciel en développement, la mise en place d'une architecture d'analyse d'image sur la production, l'implémentation de codes Python robustes et transférables.

2.3 Développements remarquables

2.3.1 Utilisation avancée de SIMPL

Le logiciel SIMPL est en cours de développement et a beaucoup évolué au cours de la thèse. Certaines fonctionnalités étant manquantes, nous les avons développées en interne. Pour cela, un langage de scripting nommé *asl* pour *Aselta Scripting Language* est utilisé. Ce langage, dérivé du Groovy et du Java, permet de générer et de manipuler les projets SIMPL.

Extraction de contour bi-niveaux

À la vue des bons résultats, certaines fonctionnalités développées en interne ont finalement été implémentées de manière officielle par Aselta. C'est notamment le cas de l'extraction de contour bi-niveaux. En effet, pour la mesure de l'overlay, il est nécessaire de ne pas inclure de désalignement lors de l'extraction de contour. Pour cela, la *seed* est réalignée de la même façon pour chacun des deux niveaux tel qu'illustré Figure 2.14. Le niveau supérieur, généralement mieux défini, est utilisé pour les deux extractions afin d'assurer un bon alignement.

Cette fonctionnalité d'alignement sur un niveau différent de celui d'extraction n'était pas disponible nativement dans le logiciel dans les premières années de la thèse. Nous avons alors développé une solution personnalisée, en *asl*, générant deux projets SIMPL successifs en forçant le positionnement de l'image lors du second projet sur les paramètres d'alignement du premier.

Par ailleurs, cette solution d'un alignement unique pour les deux extractions n'est pas robuste aux forts overlay. Pour des overlay supérieurs à la longueur de jauges, l'extraction du contour du niveau inférieur est imprécise car la *seed* est mal alignée. Dans ce cas, deux alignements distincts doivent être réalisés et la différence doit être prise en compte lors de la mesure de l'OVL. Cette situation n'est pas courante dans le suivi en ligne de l'overlay, mais plutôt lors des phases d'évaluation des performances de la mesure.

Implémentation de BCE sur SIMPL

L'option overlay n'est pas disponible nativement au sein du logiciel. Similairement au point précédent, nous avons développé un script *asl* implémentant la méthode de mesure BCE. À partir des barycentres moyens des motifs extraits, l'algorithme réalise la différence entre le niveau inférieur et le niveau supérieur et retranche la valeur nominale donnée par la *seed*. Cette nouvelle mesure est rajoutée au fichier de sortie de SIMPL de manière transparente.

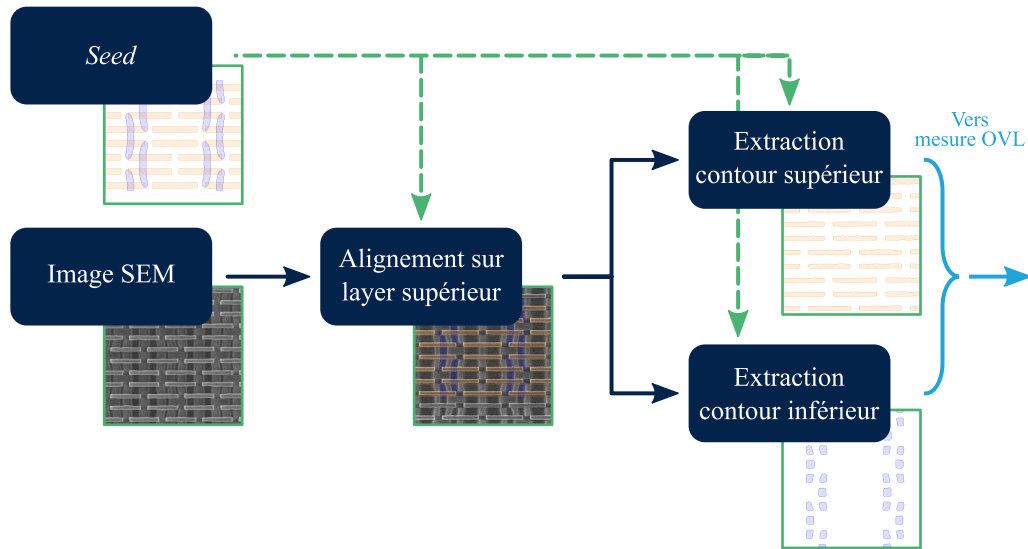


FIGURE 2.14 Diagramme de la procédure d'extraction de contours bi-niveau.

2.3.2 ImageLab

Les compétences développées lors de l'implémentation des deux fonctionnalités précédentes ont été mises à contribution pour la mise en place de l'*ImageLab*. Cette infrastructure permet d'appliquer l'extraction de contour sur les images SEM prises par la métrologie en ligne pour le suivi de la production. Elle permet donc d'accéder à une grande quantité de données et de suivre dans le temps de nouvelles métriques telle que l'OPO.

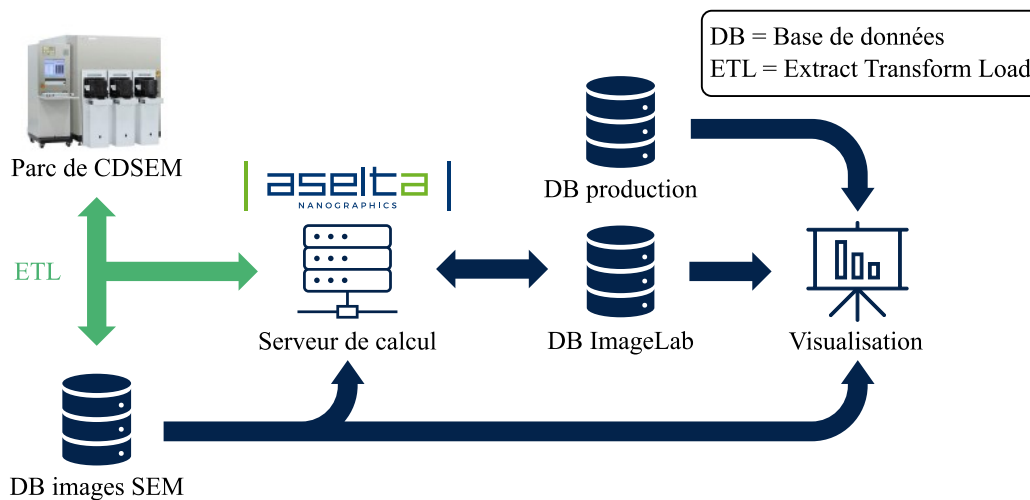


FIGURE 2.15 Schéma de l'implémentation en ligne de la métrologie par contours.

L'architecture d'ImageLab est schématisée Figure 2.15. Lorsqu'un CD-SEM prend des images d'une plaque en production, celles-ci sont stockées dans une base de données dédiée

et commune à tous les CD-SEM du parc. Cette action est gérée par un script nommé Extract Transform Load (ETL). Lorsqu'une plaque est inspectée, si la recette SEM fait partie d'un périmètre défini au sein du serveur de calcul alors la recette SIMPL correspondante est lancée. Les images sont chargées temporairement au sein du serveur de calcul, les contours sont extraits, puis la mesure désirée est réalisée. Les résultats de mesure avec certaines informations contextuelles sont finalement envoyés à la base de données dédiée d'ImageLab. Finalement une interface de visualisation permet le suivi dans le temps des mesures associées aux données contextuelles sur le lot mesuré provenant d'une base de données de la production.

Cette infrastructure se base sur un ETL pré-existant et est développée en interne à STMicroelectronics. L'apport de cette thèse au projet réside principalement mais non exclusivement dans le script `asl` inclus dans l'ETL qui permet la duplication d'un projet de référence sur les nouvelles images, le traitement des résultats et leur envoi dans la base de données ImageLab. Une aide a aussi été apportée pour la visualisation des contours extraits dans l'interface.

2.3.3 Implémentation d'un algorithme robuste en Python

La mesure de l'OPO avec la méthode BRR, plus complexe, a été développée en Python. L'implémentation de code complexe requiert une bonne organisation de celui-ci pour pouvoir le maintenir, l'améliorer et le transférer. Le laboratoire LPAC où nous avons développé le code suit la norme PEP8 afin de garantir la lisibilité et la pérennité du code implémenté [111]. Le respect de cette norme, ainsi que la proportion de commentaires et de *docstrings* aidant à la compréhension du code sont évalués à l'aide du logiciel Pylint. Ce logiciel renvoie une note sur 10 accompagnée de commentaires, la note devant être supérieure à 9 pour que le code soit accepté par le laboratoire. Les codes sont ensuite mis en commun à l'aide d'un logiciel de gestion de versions (svn), permettant de maintenir un code fonctionnel commun à tous les membres de l'équipe. Ainsi, de nombreux développements nécessaires à la manipulation de contours, de *layouts* et de projets SIMPL ont pu être mis en commun. Une amélioration future serait la mise en place de test fonctionnels gérés par une plateforme d'intégration continue telle que Jenkins qui assureraient la stabilité de l'algorithme avec les futures évolutions.

La Figure 2.16 représente de manière simplifiée les différentes bibliothèques et scripts utilisés pour l'implémentation de la mesure BRR en Python. Le cœur du code repose sur une classe Python nommée `OverBoar`. Celle-ci utilise des fonctions provenant de diverses bibliothèques, elles sont publiques et libres de droits ou privées et développées au sein du laboratoire telle que `pyleti`. Ces dernières contiennent principalement des fonctions dédiées aux manipulations de *layout*, d'images SEM avec leurs contours associés ainsi que des variables contenant les particularités du système informatique local. De plus, la majorité des fonctions nécessaires au fonctionnement d'`OverBoar` a été répartie en 7 fichiers. Chacun de ces scripts est dédié

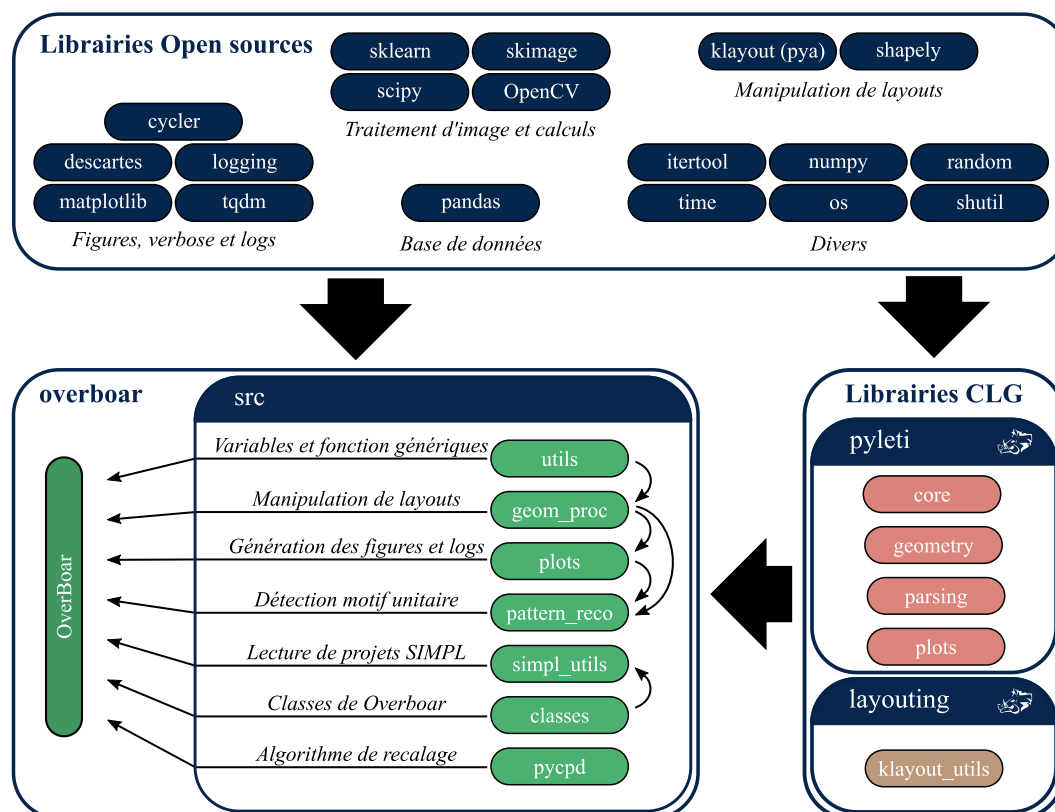


FIGURE 2.16 Schéma de l'implémentation en ligne de la métrologie par contours.

à un type de tâche précis. Le fichier `geom_proc.py`, par exemple, contient l'ensemble des fonctions additionnelles de manipulation de *layout* non incluses dans `pyleti.geometry`. Au cours du développement d'`OverBoar`, de nombreuses fonctions développées spécifiquement dans le cadre de la thèse ont intégré la librairie `pyleti` afin d'être mises en commun avec l'ensemble du laboratoire.

L'essentiel

Cette section a mis en avant trois développements clés de la thèse :

- ✧ L'**implémentation d'un alignement bi-niveaux** et de la méthode BCE sur SIMPL via des scripts asl ;
- ✧ L'**implémentation de la méthode BRR** intégrée aux développements Python du laboratoire ;
- ✧ La **mise en place d'une infrastructure de traitement en temps réel** des images prises par la métrologie en ligne, nommée *ImageLab*.

Ces développements ont permis la réalisation des expériences qui seront présentées dans les prochains chapitres. Ils ont par ailleurs eu un impact positif sur d'autres projets. Plusieurs fonctions de manipulation de *layout* et de visualisation des données overlay sont désormais partagées au laboratoire de lithographie du CEA-Leti, tandis que l'*ImageLab* sert quotidiennement pour d'autres projets à STMicroelectronics.

Les prochains chapitres mettent en application les dispositifs tout juste présentés. Le Chapitre 3 aura pour objectif d'évaluer la méthode de mesure d'overlay basée sur les Barycentre d'une Référence Réalignée (BRR) et d'extraire les premières données nécessaires pour commencer à répondre à nos problématiques 2 et 3 présentées Section 1.4.2 : Comment l'OPO varie-t-il au sein d'une plaque, d'un champ et quelle est l'amplitude du NZO ?

Chapitre 3

Évaluation des performances de l'algorithme de mesure développé

Introduction de chapitre

Ce troisième chapitre a pour objectif d'**évaluer les performances** de la méthode de mesure d'overlay basée sur le Barycentre d'une Référence Réalignée (BRR) et ainsi de répondre à la première problématique évoquée Section 1.4.2 : Est-il possible de réaliser de la métrologie On-Product SEM-OVL, i.e. directe sur le produit, avec les outils et équipements actuellement disponibles à STMicroelectronics ? La méthode BRR sera évaluée dans un premier temps sur des images SEM synthétiques, puis directement sur le produit. Ces premières données recueillies permettront par ailleurs de commencer à répondre aux problématiques 2 et 3 : Comment l'On-Product Overlay (OPO) varie-t-il au sein d'une plaque, d'un champ et quelle est l'amplitude du Non-Zero Offset (NZO) ?

La première partie consiste **étudier et réduire le bruit algorithmique de la méthode BRR**. L'algorithme de recalage est dans un premier temps optimisé. Les performances de l'ensemble de l'algorithme de mesure seront ensuite **évaluées sur des images synthétiques** : d'abord sur des motifs simples (*double patterning*) puis sur des motifs partiellement masqués. L'influence sur la mesure des paramètres d'imagerie SEM et d'extraction de contour sera ensuite évaluée avant de tester la robustesse de la mesure à la rugosité.

Dans la seconde partie, la mesure BRR sera appliquée sur des mire AIM (utilisées pour la mesure optique de l'overlay) afin d'évaluer ses **performances sur des images SEM réelles** et en comparaison avec des mesures SEM de référence.

Finalement la mesure BRR sera appliquée au cœur du produit afin d'évaluer ses **performances sur des motifs 2D complexes** tels que ceux de la SRAM. Une dernière optimisation de l'algorithme sera alors proposée à l'aide de travaux sur des images SEM synthétiques.

3.1 Étude et réduction du bruit algorithmique de la mesure BRR

3.1.1 Optimisation de l'algorithme de recalage

Le recalage de la référence sur le contour extrait est l'étape clé de la mesure de l'OVL avec la méthode BRR (cf. Section 2.2.2 page 66). Toute variabilité et tout biais induit par le recalage seront présents dans la mesure finale, le choix de l'algorithme est donc critique.

L'étape de recalage consiste plus précisément à l'étape de réalignement d'un contour connu de référence sur un contour extrait de l'image SEM. Un contour peut être vu comme une liste de points ordonnés et reliés successivement par une ligne droite. On parle de nœuds et d'arêtes. Pour recaler un contour sur l'autre, il s'agit alors de minimiser la distance entre ces nœuds. Les contours proviennent d'origines différentes, il est donc nécessaire de ré-échantillonner ces derniers en imposant la même distance d entre deux points adjacents. Cette étape est présentée Figure 3.1 où la simulation post-lithographie et le contour extrait d'une grille sont échantillonnés à 20 nm et 8 nm. Dans l'ensemble de nos travaux, l'échantillonnage sera choisi par défaut à la valeur du pas de détection de l'extraction de contours (cf. Section 2.1.4).

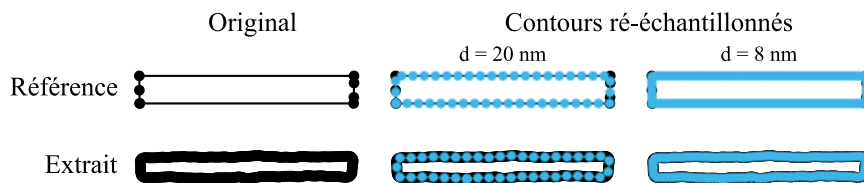


FIGURE 3.1 Les contours extraits et de référence doivent être ré-échantillonnés de manière identique avant de pouvoir les recaler.

Zhu *et al.* synthétisent en 2018 l'ensemble des solutions existantes de recalage de nuages de points qui sont utilisées dans différents domaines : reconnaissance d'objets, vision par ordinateurs, robotique et différents traitement d'image [112]. Ces solutions sont généralement utilisées pour superposer des images provenant de différents capteurs (radar, LiDAR et caméra par exemple). Nous allons ici l'appliquer pour réaligner le contour de référence (capteur n°1, idéal) avec le contour extrait (capteur n°2, zones masquées). Parmi toutes les solutions de recalage proposées, trois ont été retenues et leurs particularités sont résumées Table 3.1.

Cross-Correlation (CC) : Cette méthode se base sur le produit de convolution entre le contour à aligner (référence) et le contour extrait (cible). Pour cela, les deux *layouts* sont binarisés au préalable en image en noir et blanc (rastérisation). Le produit de

TABLE 3.1 Comparaison des trois solutions de recalages envisagée pour l'implémentation de l'algorithme BRR.

	Cross-Correlation (CC)	Iterative Closest Point (ICP)	Coherent Point Drift (CPD)
Type de données	Image	Nuage de points	Nuage de points
Correspondance	Aucune	Distance euclidienne	Probabiliste (GMM)
Transformations	Translation	Translation et rotation	Translation, rotation et grossissement
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité d'utilisation • Implémentée au laboratoire 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible variabilité • Haute résolution 	<ul style="list-style-type: none"> • Converge au minimum global • Haute résolution
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Sensible aux minimums locaux • Faible résolution 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensible aux minimums locaux • Sensible aux conditions initiales 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût de calcul élevé • Sensible aux points aberrants
Sources	[113, 114]	[115, 116]	[117, 118]

convolution génère une image, de dimension l'image cible, où le pic d'intensité correspond au meilleur alignement. Des méthodes basées sur les transformées de Fourier sont plus efficaces et permettent un alignement sub-pixelique [113]. Dans le cadre de la thèse, la fonction `phase_cross_correlation` de la librairie open-source `skimage` est déjà implémentée au sein du laboratoire et sera donc utilisée [114]. À noter que cette fonction est aussi utilisée dans les algorithmes BRR et BCE pour la détection de motifs unitaires à l'aide de la référence (étape 2 Section 2.2.2).

Iterative Closest Point (ICP) : Introduite dès 1992 par Besl et McKay [119] et Zhang [120], cette technique fonctionne directement avec les contours. Plus précisément, l'algorithme vise à minimiser de manière itérative la distance entre les nœuds des contours cible et de référence. Chaque itération se décompose en deux étapes principales. La première consiste à associer les points en paires. Chaque point de la référence est associé au point de la cible le plus proche. La transformation rigide (translation et rotation) qui minimise la distance entre ces points appairés est alors calculée et appliquée. Cette étape est répétée jusqu'à convergence comme illustré Figure 3.2a. [115, 116]. Dans le cadre de ce projet, nous utiliserons l'implémentation libre de droit de Drakoulis [115] basée sur les travaux de F. Lu et E. Milios [116].

Coherent Point Drift (CPD) : Cette méthode peut être vue comme la version probabiliste de l'ICP. Chaque nœud du contour de référence est associé à une gaussienne. Cette gaussienne est décrite par sa moyenne (la position du nœud) et son écart-type (rayon d'influence). Les nœuds du contour extrait (Cible) sont eux associés de manière probabiliste à ces gaussiennes, en fonction de leur distance à leur moyenne et de leur rayon d'influence. On parle de *Gaussian Mixture Model* (GMM). Ensuite, un algorithme nommé Expectation Maximization (EM) permet de déplacer ces gaussiennes et de varier leur écart-type afin de les répartir uniformément sur les nœuds du contour

extrait. Pour cela, la fonction de vraisemblance est maximisée itérativement ¹. Trois itérations de cet algorithme sont illustrées pour le cas 1D dans la Figure 3.2b. Nous utiliserons la version 1.0 de l'implémentation `pycpd` réalisée par Siavash Khallaghi basée sur les travaux de Myronenko et Song [117, 118]. Cette version sera légèrement modifiée pour interdire la rotation et le grossissement du motif à recalcr.

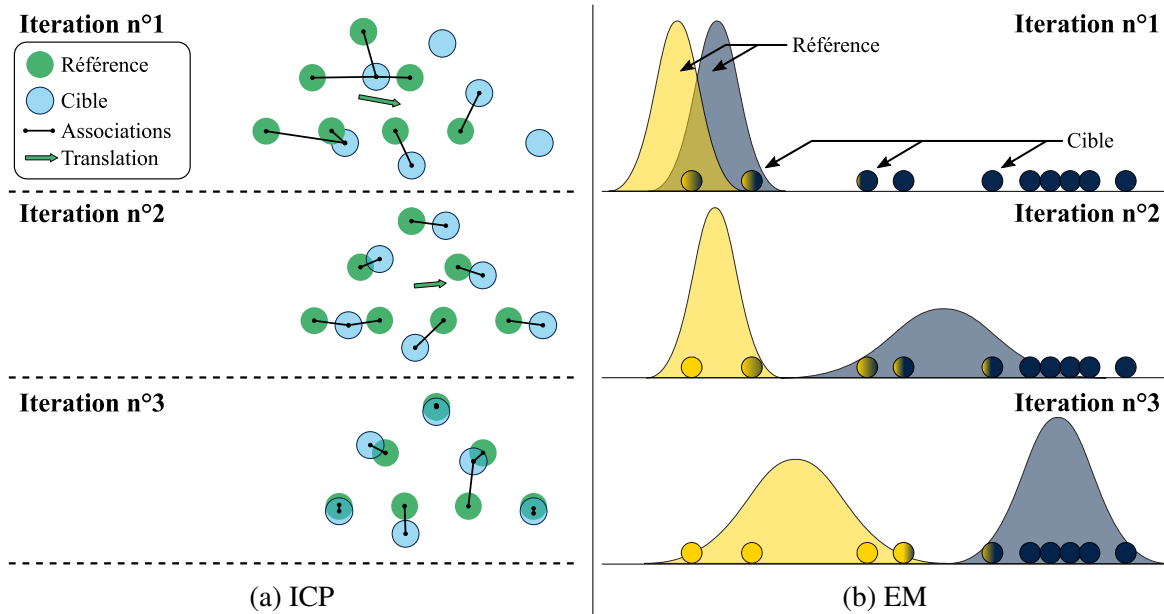


FIGURE 3.2 Schémas du processus de recalage ICP (a) et de l'algorithme d'Expectation Maximization (EM) en 1D (b). Adapté des travaux de V. Lavrenko.

Les trois algorithmes sélectionnés ont été implémentés au sein du laboratoire. Afin de déterminer le plus performant pour notre application, nous les avons évalués pour le recalage des motifs de la SRAM. Les résultats sont illustrés Figure 3.3.

Premièrement, chaque méthode a été appliquée à plusieurs reprises en variant légèrement la position initiale, six recalages sont représentés sur la Figure 3.3a. Le recalage par cross-correlation, tel qu'implémenté, montre une variabilité supérieure aux deux autres méthodes. Cette variabilité peut s'expliquer par la plus faible résolution (taille des pixels $D_{PE} = 1$ nm) qui entraîne une binarisation différente et donc un résultat de la convolution qui varie légèrement. Selon les travaux de Zhu *et al.*, ICP et CPD ont la même complexité et les mêmes temps de calcul [112]. Dans le cas de notre implémentation Python, l'algorithme CPD est plus lent. Cela est dû à une utilisation plus importante de fonctions personnalisées et donc moins optimisées et non compilées. Cet aspect pourra être amélioré dans le cas d'une implémentation en production de l'algorithme. À ce jour, le temps de calcul de l'ensemble de

1. L'algorithme EM est expliqué de manière très claire par V. Lavrenko sur ce lien : <http://bit.ly/EM-alg>

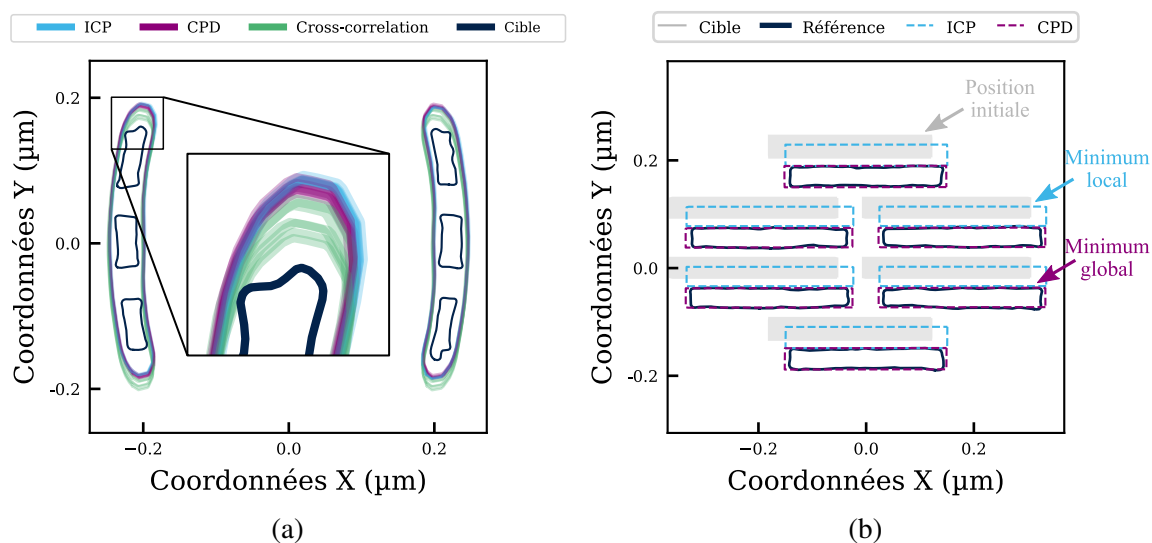


FIGURE 3.3 Évaluation des trois algorithmes de recalage sur les motifs de la SRAM. (a) Test de la répétabilité du recalage sur un contour extrait des “haricots” de la zone Active (b) ICP tombe dans des minimums locaux sur les motifs réguliers et matriciels telles que les grilles de la SRAM.

l’algorithme BRR est de quelques secondes par image. Cette valeur dépend essentiellement de la quantité de nœuds du contour, et donc de la taille du motif imagé et de la précision attendue.

Une seconde évaluation, illustrée Figure 3.3b, départage finalement les deux algorithmes. Le principal défaut d’ICP le rend incompatible avec notre application : les motifs réguliers et matriciels telles que les grilles le poussent à tomber dans des minimums locaux.

Finalement, l’algorithme de recalage **CPD est sélectionné** pour le recalage de la référence sur le contour extrait au sein de la mesure BRR.

3.1.2 Évaluation des performances sur des images SEM synthétiques

Avant de pouvoir appliquer la mesure BRR sur des images SEM issues de produits de STMicroelectronics, l’algorithme est testé sur des images synthétiques générées à l’aide de Nebula avec l’empilement présenté Section 2.1.5 page 58.

Dans un premier temps, l’algorithme BRR est évalué sur un niveau relativement simple, où les deux niveaux sont totalement visibles. La structure constituée de deux croix présentée Figure 2.8a est utilisée : 28 images synthétiques avec de l’OVL programmé entre -50 nm et 50 nm ont été générées et mesurées tel qu’illustré Figure 3.4a. Le motif fait 210 nm de coté, les deux croix sont espacées de 90 nm en X et alignée en Y dans leur position nominale. Le pixel fait 2 nm sur ces images. La Figure 3.4b présente la corrélation entre les mesures

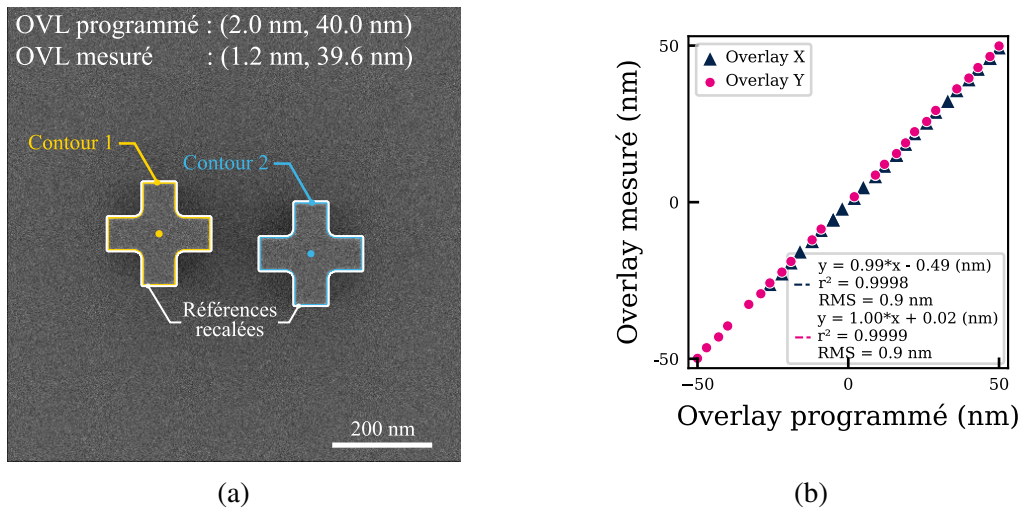


FIGURE 3.4 Évaluation de l'algorithme BRR sur des images synthétiques contenant deux niveaux parfaitement visibles. (a) Exemple du résultat de l'algorithme sur deux croix identiques. En jaune et bleu les contours extraits des niveaux inférieurs et supérieurs et en blanc les deux références recalées sur les deux contours. (b) Corrélation entre les OVL programmés et mesurés sur 28 images synthétiques.

et la valeur de l'overlay programmé sur l'image. Les deux axes X et Y présentent de très bonnes métriques, avec une pente proche de 1, un r^2 de 0.999 ainsi qu'un RMS (cf. définition page 65) de 0.9 nm. Le biais légèrement plus élevé selon X est surprenant et son origine reste inconnue.

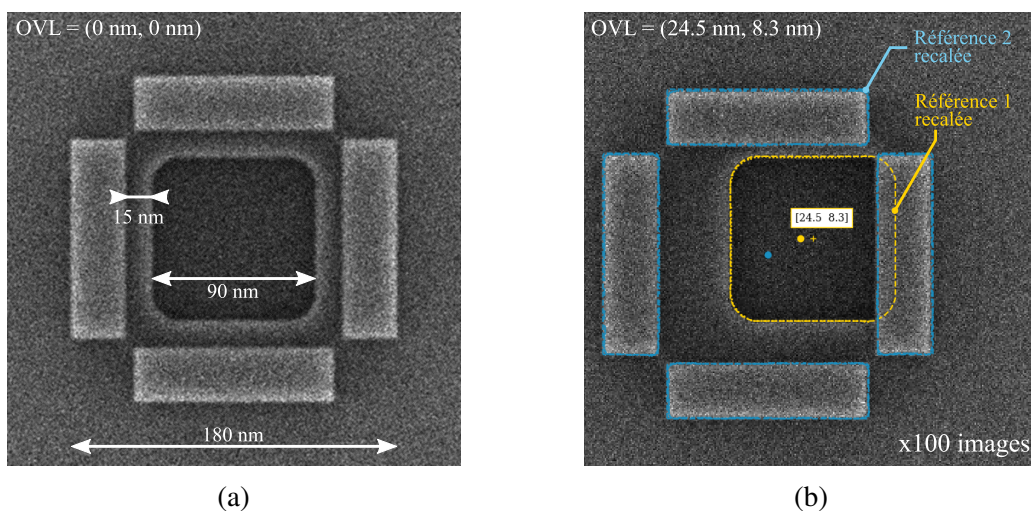


FIGURE 3.5 Évaluation des performances de la mesure sur un motif partiellement masqué. (a) Le motif utilisé est inspiré des *Bars in Bars* présentés Figure 1.19. (b) 100 images SEM synthétiques sont générées avec de l'overlay programmé allant jusqu'à 25 nm puis sont mesurés.

Dans un second temps, un motif inspiré des *Bars in Bars* (cf. Figure 1.19) est modélisé afin d'évaluer les performances de l'algorithme BRR lorsque le niveau supérieur vient partiellement masquer le niveau inférieur. La Figure 3.5a donne les principales dimensions de ce motif : 4 grilles entourent une zone active carrée de 90 nm de côté avec un espacement de 15 nm. Les pixels ont une taille de 1 nm. De l'overlay entre ces deux niveaux a été programmé sur 100 motifs. L'overlay varie sur l'intervalle [-25 nm, 25 nm] en X et en Y, jusqu'à 10 nm de la zone active sont donc possiblement masqués par les grilles. Les paires d'overlay (X, Y) sont associées aléatoirement pour garantir l'uniformité de la répartition. Pour chaque image, les contours sont extraits à l'aide de SIMPL et l'algorithme de mesure d'OVL BRR est appliqué.

Comme le montre la Figure 3.6a les deux mesures en X et en Y présentent de bonnes corrélations avec les overlay programmés. Les deux régressions linéaires montrent des pentes de 1.00, des coefficients de corrélation de 0.9999 et un biais de ± 0.01 nm. Comme discuté Section 2.2.1 page 65, nous évaluons l'incertitude de la mesure via l'erreur RMS, l'incertitude estimée sur cette mesure est donc de 0.5 nm.

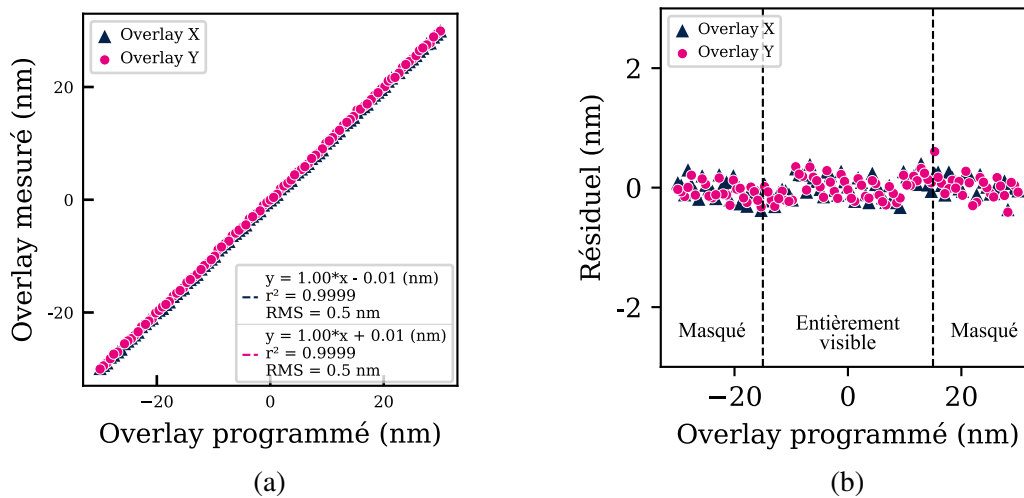


FIGURE 3.6 Évaluation de la mesure BRR sur un motif partiellement masqué. (a) Corrélation de la mesure avec l'overlay programmé sur l'image synthétique. (b) Évolution du résiduel (erreur sur la mesure) en fonction de l'overlay programmé. Le chevauchement du niveau supérieur sur le motif inférieur autour des 15 nm d'OVL provoque une augmentation temporaire de l'erreur de mesure.

Afin d'analyser plus finement l'erreur de mesure, nommée résiduel, celle-ci est représentée Figure 3.6b en fonction de l'overlay programmé. Les deux barres verticales représentent la zone de chevauchement entre les niveaux supérieurs et inférieurs. Deux principales interprétations peuvent être tirées. Premièrement, le résiduel est stable loin des zones de

chevauchement et de même amplitude même lorsque le niveau inférieur est partiellement masqué (RMS = 0.4 nm). Deuxièmement, il semblerait que le recouvrement ait un impact sur le résiduel quelques nanomètres avant la superposition des deux niveaux. En effet, lorsque les bords des deux motifs se rapprochent, l'extraction de contour devient moins stable et peut "accrocher" au mauvais bord. Pour cela nous avons instauré une zone d'exclusion de 5 nm autour du niveau supérieur où le contour inférieur n'est pas extrait, ce paramètre peut être optimisé pour réduire cet effet.

Pour conclure, la mesure basée sur le Barycentre d'une Référence Réalignée (BRR) montre une bonne corrélation avec l'overlay programmé sur des images synthétiques, même dans le cas de motifs partiellement masqués. L'incertitude sur la mesure, issue du RMS, dépend du motif observé. Si la mesure sur un motif partiellement masqué ne montre pas un résiduel plus élevé que lorsque celui-ci est totalement visible, l'étape de chevauchement détériore légèrement le RMS (0.1 nm sur le cas présenté). Il est donc préférable d'étudier des motifs où la situation de masquage est constante.

3.1.3 Étude de la robustesse vis-à-vis des paramètres SEM et d'extraction de contour

La performance de l'algorithme de mesure est *a priori* impactée par la qualité de l'image SEM et du contour. Cette section vise à évaluer la robustesse de l'algorithme BRR vis-à-vis de ces paramètres.

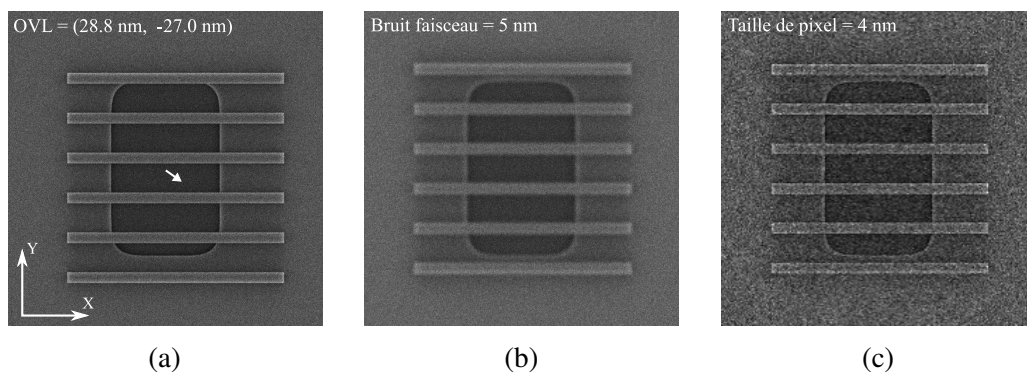


FIGURE 3.7 À partir d'une image de référence (écart type du bruit blanc = 1 nm, taille de pixel = 1 nm, OVL = (0 nm, 0 nm)), les paramètres d'imagerie SEM sont modifiés afin d'étudier la réponse de la mesure. (a) De l'overlay entre la Grille et l'Active a été rajouté sur l'intervalle [-30 nm, 30 nm]. Ici, le niveau Grille est déplacé de 28.8 nm horizontalement et de -27.0 nm verticalement; (b) Image de référence avec une déviation gaussienne de 5 nm implémentée dans la source primaire d'électrons; (c) Image de référence avec une taille de pixel plus grande : 4 nm.

Deux expériences successives ont été mises en place. Premièrement, l'influence de trois paramètres clés du SEM est évaluée : la taille des pixels (D_{PE}), le bruit blanc simulé par une dispersion spatiale du faisceau d'électrons, et l'influence du bruit de grenaille. L'étude porte ensuite sur l'impact de la longueur des filtres longitudinaux et orthogonaux qui sont appliqués lors de l'extraction de contours (cf. Section 2.1.4). La Figure 3.7 montre le motif simulé ainsi que les impacts du bruit blanc et de la taille de pixel sur la qualité de l'image. La Table 3.2 récapitule les recettes SEM et SIMPL utilisées ainsi que l'ensemble des paramètres étudiés. Chacun de ces paramètres est balayé sur un intervalle noté "[début - fin, n = nombre de points]" à partir d'une recette de référence. Pour chaque condition SEM et SIMPL, 100 images sont générées lorsque nécessaire, les contours sont extraits et l'algorithme BRR est appliqué. Ensuite, pour chaque recette de 100 images, l'overlay mesuré est corrélé avec l'OVL programmé pour calculer les métriques de pente, de biais, de RMS et le nombre de points aberrants.

TABLE 3.2 Récapitulatifs des principaux paramètres de génération d'image SEM et de l'extraction de contours. Les intervalles sont notés "[début - fin, n = nombre de points]".

Objectif	Recette SEM				Recette contours			
	Taille des pixels (nm/pix)	Énergie (eV)	Bruit blanc (σ , nm)	Bruit de grenaille	Longueur de jauges (nm)	Pas (nm)	Filtre longitudinal (nm)	Filtre orthogonal (nm)
Référence	1	800	1	Oui	40	5	10	5
Bruit blanc	1	800	[0-8, n = 5]	Oui	40	5	10	5
Taille de pixel	[1-8, n = 8]	800	1	Oui	40	[1-8, n = 8]	10	5
Bruit de grenaille	1	800	1	Non	40	5	10	5
Filtre longitudinal	1	800	1	Oui	40	5	[5-30, n = 6]	5
Filtre orthogonal	1	800	1	Oui	40	5	10	[0-20, n = 5]

La Figure 3.8 récapitule l'ensemble des résultats. 2 200 contours ont été extraits pour la réalisation de cette étude, sur un total de 1 300 images SEM générées. Chaque ligne correspond à une métrique étudiée et chaque colonne correspond à un paramètre étudié. Chaque point provient d'une courbe de corrélation similaire au cas précédent (cf. Figure 3.6a). Le bruit de grenaille a quant à lui montré un faible impact sur la mesure et n'est pas représenté ici.

La Figure 3.8 montre des métriques stables pour une taille de pixel inférieure à 4 nm. Au dessus de cette valeur la qualité de la mesure se dégrade fortement, en particulier l'erreur RMS en X passe de 0.86 nm à 3.66 nm entre un pixel de 4 nm et un pixel de 6 nm. L'algorithme est par ailleurs très robuste au bruit blanc. Même pour des images très floue avec un écart-type du faisceau de 5 nm (cf. Figure 3.7b), la pente et le r^2 restent proche de 1, avec une erreur RMS 1.2 nm en X et 1.8 nm en Y. Cela représente une augmentation de 0.4 nm et 1.0 nm respectivement en X et en Y vis-à-vis de l'image de référence.

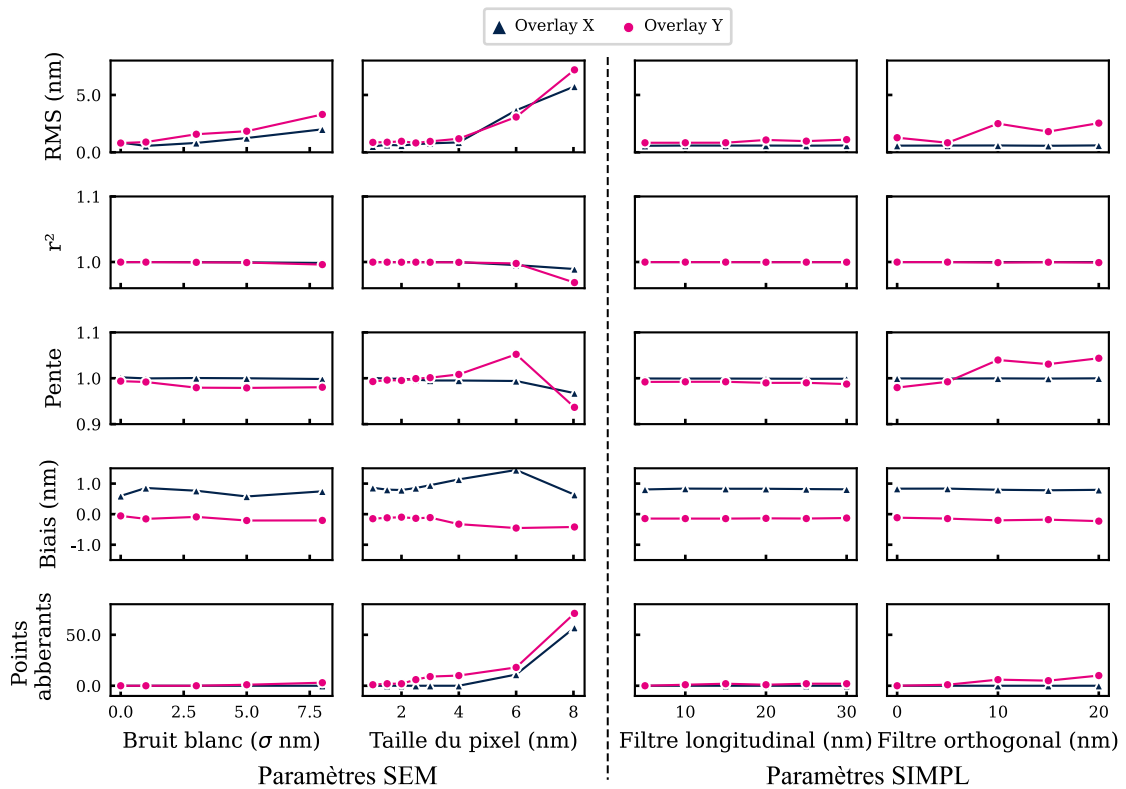


FIGURE 3.8 Étude de l'influence des paramètres SEM (bruit gaussien et taille des pixels) et SIMPL (filtres) sur les performances de la mesure BRR.

Pour conclure, le choix des paramètres SEM, dans une certaine limite, a peu d'influence sur les performances de la mesure de l'overlay basée sur le Barycentre d'une Référence Réalignée. Nous démontrons une incertitude à 3σ sur la mesure comprise entre 0.8 nm et 0.9 nm pour un pixel inférieur à 4 nm ainsi qu'une incertitude de 1.8 nm pour une image très floue ($\sigma = 5$ nm). D'autre part l'étude sur les paramètres d'extraction de contour représentés Figure 3.8 ne montre aucun effet du filtre longitudinal, tandis que le filtre orthogonal le plus faible possible semble offrir de meilleures performances. Ces observations sont en adéquation avec les conseils d'ASELTA : le filtre orthogonal a tendance à générer des artefacts dans le contour. Il faut cependant nuancer ces résultats, l'extraction a été effectuée sur des images synthétiques aux bords relativement nets : l'absence d'ombrage, d'arrondissement de bords et de rugosité facilite l'extraction de contour. Dans un cas pratique réel, l'usage de filtres longitudinaux sera probablement nécessaire pour lisser le contour.

3.1.4 Impact de la rugosité

L’usage de filtres pour l’extraction de contour est intéressant dès lors que de la rugosité est présente. Une série de 100 images avec de la rugosité programmée sur le *layout* ont été simulées puis mesurées. Les paramètres Nebula et SIMPL de référence du Tableau 3.2 sont utilisés avec un filtre longitudinal de 5 nm. La Figure 3.9a montre des motifs rugueux et les contours extraits correspondants. Les références recalées sur le contour extrait sont représentées Figure 3.9b : la rugosité paraît alors “lissée” par le bord droit de la référence, et la partie masquée du niveau inférieur est placée correctement.

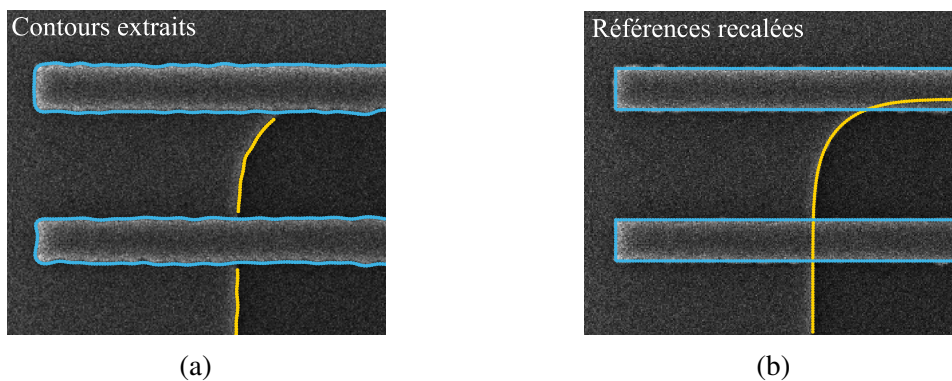


FIGURE 3.9 Contour extrait (a) et résultat de la mesure BRR (b) sur les images SEM du motif rugueux.

La rugosité a été implémentée à l’aide de la classe `RoughnessStrategyFactory` développée en interne et basée sur l’*Auto Correlation Function* (ACF). La modélisation de la rugosité est un sujet complexe et ne sera pas traitée ici, pour approfondir le lecteur pourra voir la thèse de L. Azarnouche et les travaux de C. Mack [121–123]. Trois paramètres sont disponibles : σ_{ACF} la variance, x_i la longueur de corrélation et α l’exposant de rugosité. La distance de discrétisation d et un bruit blanc σ_{blanc} peuvent aussi être rajoutés. Des valeurs légèrement différentes sont utilisées sur le niveau Active et sur le niveau Grille afin d’être vraisemblables, celles-ci sont détaillées dans le Tableau 3.3.

TABLE 3.3 Paramètres de la génération de la rugosité sur les images synthétiques à l’aide de l’*Auto Correlation Function* (ACF).

Niveau	σ_{ACF} (nm)	x_i (nm)	α	d (nm)	σ_{blanc} (nm)
Active	3	10	0.5	10	1
Grille	1	10	0.5	10	1

La Figure 3.10b présente l'évolution du résiduel avec l'overlay programmé dans le cas de référence et dans le cas où de la rugosité a été rajoutée. L'ajout de rugosité dégrade le RMS de la mesure, en passant de 0.8 nm à 1.2 nm. Il est intéressant de noter que la dégradation a lieu principalement pour des overlay programmés supérieurs à 15 nm lorsqu'une partie du contour du niveau Active est masquée par le niveau Grille. De plus l'implémentation actuelle de la rugosité peut légèrement altérer l'overlay programmé.

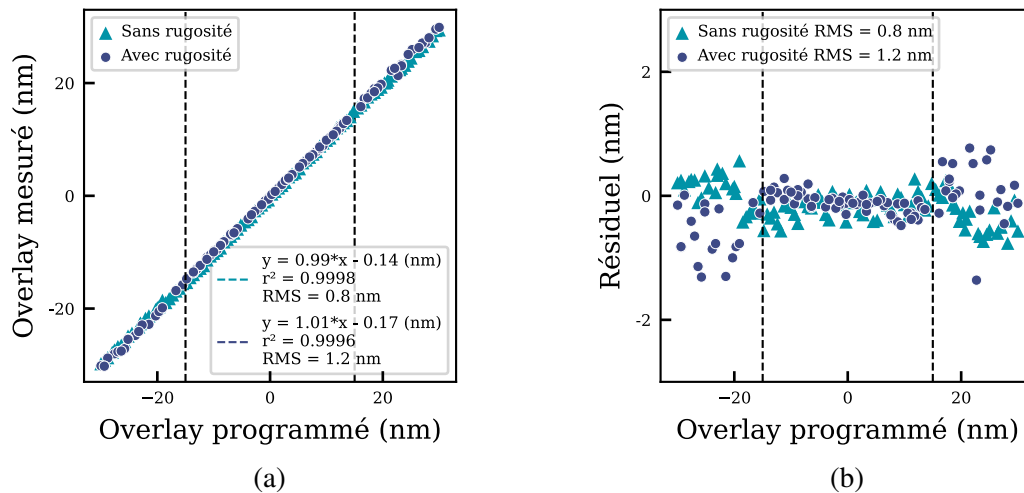


FIGURE 3.10 Évaluation de la méthode BRR sur un motif partiellement masqué avec de la rugosité. (a) Corrélation de la mesure avec l'overlay programmé sur l'image synthétique. (b) Évolution du résiduel (erreur sur la mesure) en fonction de l'overlay programmé.

Pour conclure, nous avons testé l'algorithme BRR sur un motif partiellement masqué avec de la rugosité implémentée lors de la génération de l'image SEM. Une seule amplitude de rugosité a été testée, et le contour a été extrait sans faire varier les différents paramètres de filtres. Ce test n'a donc pas pour objectif de quantifier l'impact de la rugosité, mais de démontrer la capacité de l'algorithme à fonctionner dans ces conditions. On observe une dégradation attendue de la mesure. Lors des futures applications sur des cas réels, un effort supplémentaire sera réalisé lors de la calibration du modèle d'extraction de contour afin d'optimiser le contour autour de la zone partiellement masquée.

L'essentiel

Cette section s'est consacrée à l'**étude et à la réduction du bruit algorithmique** de la mesure de l'overlay basée sur le Barycentre d'une Référence Réalignée (BRR). Le choix de la méthode de recalage a été justifié dans une première étude. L'**algorithme de recalage CPD**, basé sur la minimisation de la distance entre deux nuages de points associés de manière probabiliste permet un recalage stable et précis du contour de référence sur le contour extrait. La mesure BRR a pu ensuite être évaluée sur des **images synthétiques** générées sur Nebula. De bonnes corrélations ont été obtenues avec des overlay programmés : sur des motifs simples entièrement visibles, puis sur un motif similaire au produit dont le niveau inférieur est partiellement masqué. Des résiduels RMS inférieurs au nanomètre ont été obtenus. La stabilité de la mesure vis-à-vis de la taille du pixel et du bruit dans un certain intervalle et l'indépendance de la mesure aux filtres d'extraction de contour ont été démontrés. Enfin la robustesse de l'algorithme vis-à-vis de la rugosité a été observée sur un cas particulier. Nous avons ainsi démontré la robustesse de la solution et de l'approche implémentée, et nous pouvons l'utiliser pour la suite de nos travaux avec confiance. La variation des performances de l'algorithme (RMS allant de 0.5 nm à 1.8 nm) entre les différents motifs observés surligne déjà une difficulté de la mesure sur le produit : le **choix du motif observé** a un impact non négligeable sur la qualité de la mesure.

La prochaine partie met en application l'algorithme BRR sur des images prises sur les mires de mesures overlay optiques de références (IBO). Les mesures SEM basées sur le Barycentre d'une Référence Réalignée pourront donc être évaluées vis-à-vis de la mesure optique et SEM provenant de l'équipement.

3.2 Validation sur les mires optiques de référence

Le laboratoire de métrologie en ligne du CEA-Leti dispose d'un masque de lithographie sur lequel de l'overlay a été programmé lors de sa conception. Ce masque, nommé *AGUA*, dispose en particulier de plusieurs mires d'overlay optique contenant directement les deux niveaux. Une seule exposition suffit donc à définir la mire, ce qui assure la précision de l'overlay programmé.

3.2.1 Plan d'expérience

Une plaque a été réalisée à l'aide de ce masque. Seule l'étape de lithographie (couchage, exposition et développement) a été effectuée. Nous avons mesuré 27 mires d'overlay par champ, sur 5 champs afin d'obtenir 135 points de corrélations. L'overlay programmé sur ces mires est compris dans l'intervalle ± 15 nm. Comme abordé Chapitre 1 Section 1.3, les mires AIM sont composées de 4 cadrants de $15 \mu\text{m}$ par $15 \mu\text{m}$. Le FoV du SEM, étant de l'ordre de $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$, ne permet pas l'observation directe de ces cadrants. La solution retenue est illustrée Figure 3.11. Pour chaque mire AIM, deux cadrants seront mesurés sur les quatre disponibles : un pour chaque axe X et Y. Les cadrants étant composés de deux réseaux de 6 barres positionnés en miroir, une image SEM est prise pour chaque barre à l'interface des deux niveaux. Pour imiter la mesure optique, nous ne mesurerons l'overlay que sur les 4 barres centrales. Les barres extérieures (1 et 6) sont retirées de la mesure afin de limiter les effets de bords. Le FoV de ces images est de $2.3 \mu\text{m} \times 3.0 \mu\text{m}$, pour une taille de pixel rectangulaire de $0.6 \text{ nm} \times 8.0 \text{ nm}$. Pour la mesure du cadrant Y, le balayage du faisceau est tourné de 90° afin de revenir dans le cas du cadrant X. Un total de 1080 images SEM a été nécessaire.

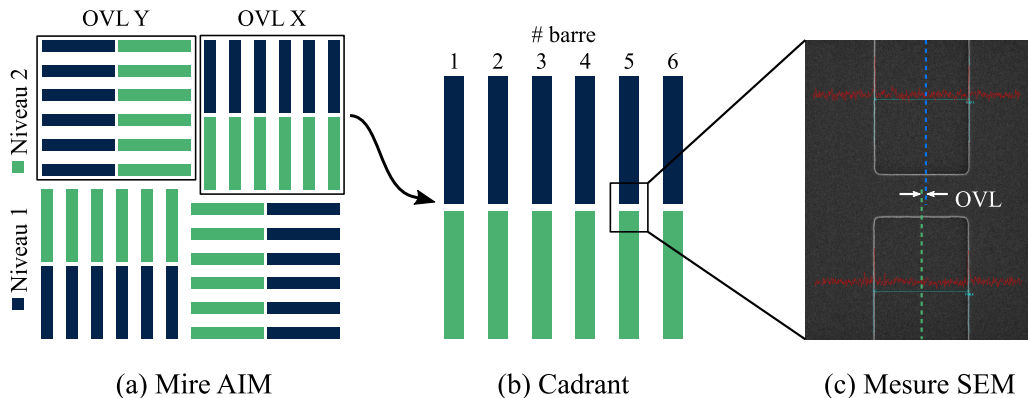


FIGURE 3.11 Schéma de mesure de l'overlay sur les mires AIM au CD-SEM. Deux cadrants sont mesurés par mire via une prise d'image SEM par barre mesurée.

Deux méthodes de mesures SEM ont été appliquées. Sur ce motif relativement simple, la fonction barycentre du SEM utilisé (Verity 6i) permet la mesure de l'overlay entre les deux barres. Cette mesure (illustrée Figure 3.11c) nous servira de référence pour qualifier la méthode de mesure BRR. Les images des mesures sont présentées Figure 3.12. Sur chaque image SEM, les contours des motifs des niveaux inférieurs et supérieurs sont extraits. Le contour théorique de la mire, servant de référence, est ensuite recalé sur le contour extrait tel que sur la Figure 3.12b. A noter que le recalage d'un contour de référence sur ce type d'images rajoute une forte complexité et n'a que très peu d'intérêt pour de la mesure en

production. L'intérêt de cette expérience réside dans la qualification de l'algorithme BRR vis-à-vis de l'algorithme du SEM et vis-à-vis d'overlay connus sur des motifs simples.

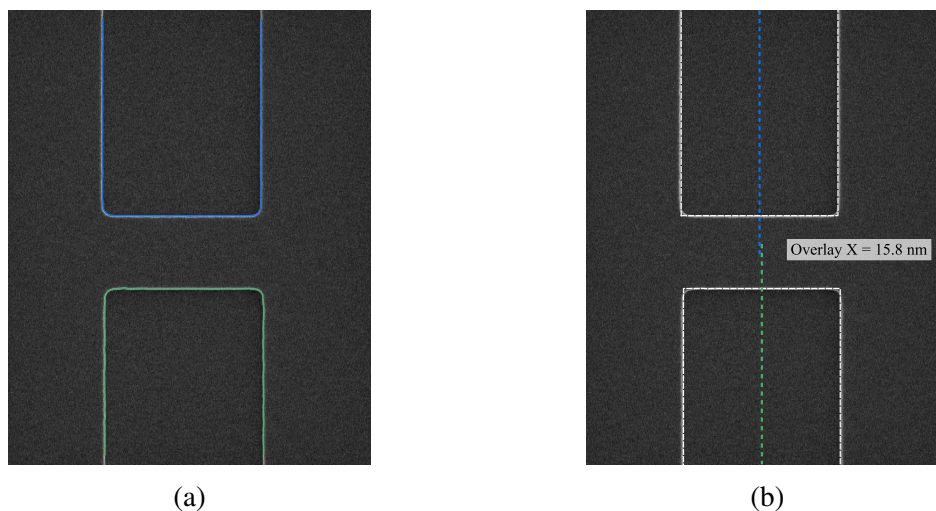


FIGURE 3.12 Illustration de la mesure de l'overlay basée sur le Barycentre d'une Référence Réalignée (BRR) sur les barres des AIMS. (a) Contours extraits sur SIMPL. (b) Références réalignées sur les contours pour la mesure de l'OVL.

3.2.2 Évaluation des performances

La Figure 3.13 montre les corrélations de la mesure avec (a) l'overlay programmé et (b) la mesure SEM Verity. Dans les deux cas, la corrélation est bonne avec un RMS de 0.4 nm et un NRE de 0.2 nm. La mesure par la méthode BRR présente cependant un biais non-négligeable vis-à-vis de l'OVL programmé : -0.75 nm en X et -0.44 nm en Y. Cet écart est par ailleurs plus élevé entre la mesure SEM Verity et l'overlay programmé : -0.97 nm et -0.56 nm. La mesure optique, non représentée ici, est la plus proche de la valeur programmée avec un NRE de 0.1 nm et un biais de 0.02 nm dans les deux axes.

Cet écart peut être expliqué par la plus faible intégration de signal sur les mesures SEM par rapport à la mesure optique. En effet, seul le bout (1 μm sur les 10 μm) des barres est observé. De plus, uniquement 2 cadrants sur les 4 disponibles sont mesurés. Au final, seulement 4% des bords de la mire sont utilisés pour la mesure SEM, contre 80% pour la mesure optique. La plus faible quantité de bords induit une plus grande influence du bruit de l'image et de la rugosité des barres sur la mesure.

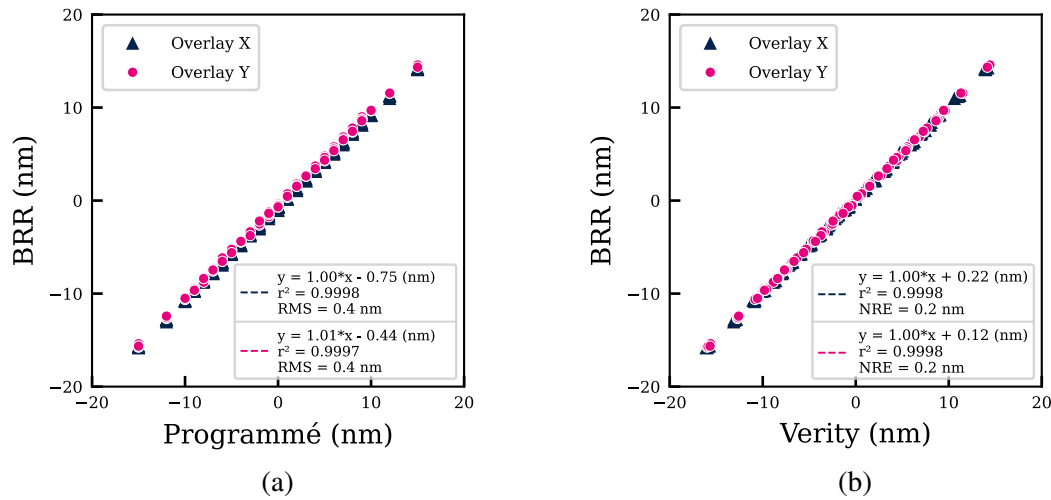


FIGURE 3.13 Corrélations de la mesure OVL BRR avec (a) l'overlay programmé et (b) la mesure SEM Verity.

3.2.3 Variation de l'overlay au sein de la mire

L'échantillonnage de la mesure SEM au sein de la mire AIM permet d'étudier la variabilité de l'overlay au sein même de celle-ci. La Figure 3.14 montre la distribution de l'écart à la moyenne par mire, pour chacune des barres mesurées via BRR. Les résultats sont sans surprise très similaires entre les axes X et Y. L'écart-type global est de 0.21 nm, c'est-à-dire que l'overlay au sein d'une mire AIM semble varier de ± 0.63 nm (3σ) autour de sa valeur moyenne !

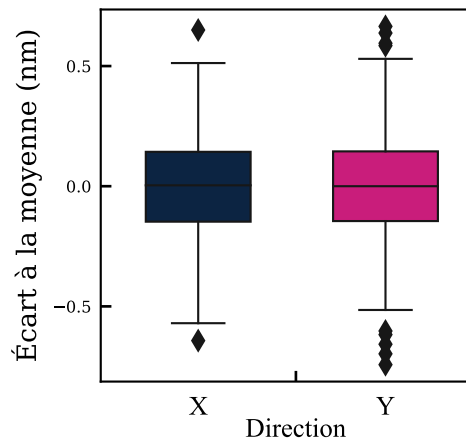


FIGURE 3.14 Distribution de l'écart à la moyenne par mire, pour chacune des barres mesurées, via la méthode BRR.

Nous mettons ici en lumière une différence intrinsèque entre la mesure optique et la mesure SEM. La mesure optique intègre le signal sur une grande surface afin de fournir une mesure stable et représentative des variations millimétriques de l'OVL (à l'échelle du champ). Au contraire, la mesure SEM est effectuée sur de plus petit motifs et rend compte de la variation de l'overlay à une échelle microscopique, au sein même d'une mire ou d'un bloc mémoire.

L'essentiel

L'algorithme de mesure de l'overlay par Barycentre d'une Référence Réalignée (BRR) a été **évalué sur des images SEM réelles**. Nous avons démontré des performances similaires à la mesure SEM Verity dans le cas d'un motif simple sans superposition, telle que la mire AIM. Les corrélations des mesures de BRR avec l'OVL programmé sur les mires montre une incertitude de 0.4 nm. Cette valeur, du même ordre de grandeur que lors des tests sur images synthétiques, confirment la **représentativité de nos simulations antérieures et les performances de BRR**. Cette expérience a par ailleurs mis en valeur les différences intrinsèques entre la mesure optique et celle par SEM : le **SEM capte des variations locales** de l'overlay, à des fréquences spatiales de l'ordre du micromètre. En effet, même si sur une mire AIM les mesures optiques corrélaient à la mesure SEM moyenne, le SEM observe une variation d'OVL de ± 0.63 nm (à 3σ) sur la mire.

Après avoir été qualifié sur des images synthétiques puis sur des images réelles d'un motif simple et connu, l'algorithme BRR peut enfin être appliqué sur des motifs complexes du produit. La prochaine partie sera dédiée à l'application de notre méthode pour mesurer l'overlay directement au cœur de la puce, dans la SRAM.

3.3 Application de l'algorithme BRR sur la SRAM

La SRAM, pour *Static Random Access Memory*, est l'une des cellules les plus critiques de la puce. De par sa densité élevée, il est fréquent que la défaillance ait lieu dans la SRAM lorsque l'overlay est hors des spécifications. À ce jour, l'overlay dans la SRAM ne peut être mesuré que par des coupes TEM. Cette mesure, destructive et lente, n'est effectuée que lorsqu'une investigation complexe est mise en place pour comprendre les modes de défaillances des puces et ne permet pas de faire de statistiques.

Être capable de mesurer l'overlay directement dans la SRAM, en ligne et de manière non destructive serait un grand atout. Dans cette Section, nous allons évaluer la capacité de

l'algorithme BRR à mesurer l'overlay directement dans ce bloc mémoire. Ces travaux ont été publiés en 2022 [110, 124].

3.3.1 Plan d'expérience

Les masques d'un produit de la technologie 28 nm de STMicroelectronics ont été utilisés pour cette expérience. La plaque a suivi le procédé de fabrication classique jusqu'au niveau Grille, où de l'overlay a été programmé volontairement à l'aide du scanner. Pour améliorer la définition des grilles dans la SRAM sur les technologies 28 nm, celles-ci sont réalisées à l'aide de deux lithographies successives via la technique du *line cutting* détaillé Section 1.1.3 page 13. Cette technique est illustrée Figure 3.15a. Une lithographie "Grille" vient définir les bords verticaux des grilles, tandis qu'une seconde lithographie "Cut" vient couper les lignes horizontalement pour réduire l'arrondissement des coins. Dans une telle situation, l'overlay entre les grilles et la zone active est défini par deux lithographies : en X la lithographie Grille, et en Y la lithographie Cut. La plaque que nous utiliserons a donc été exposée à deux reprises avec de l'overlay programmé. La Figure 3.15b cartographie l'overlay appliqué par le scanner en Y lors de la lithographie Cut. Pour chacune des deux lithographies, un overlay compris entre -20 nm et +20 nm a été ajouté par champ en X et en Y. L'association des deux lithographies forme au final des paires aléatoires d'overlay X et Y.

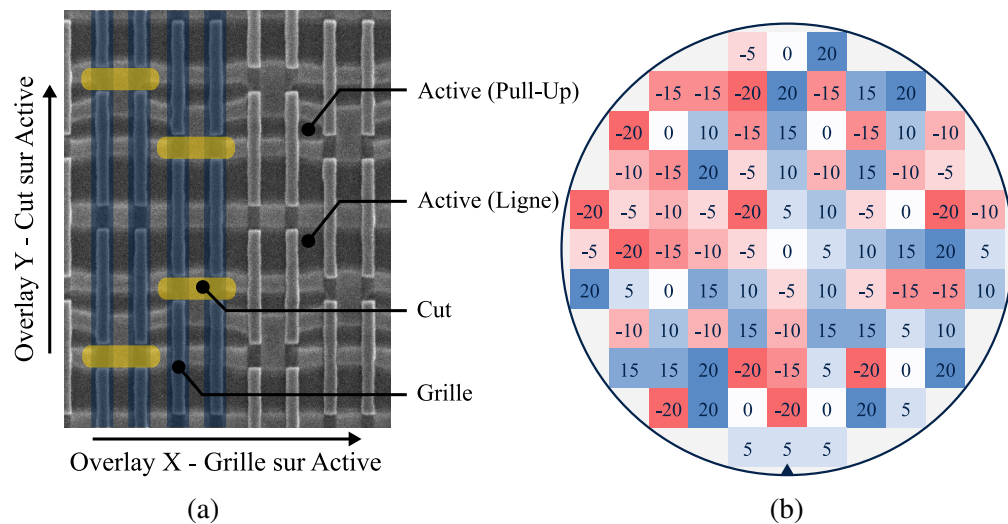


FIGURE 3.15 (a) Le niveau Grille dans la SRAM est défini par deux lithographies nommées Cut et Grille (cf. Section 1.1.3 page 13) (b) Cartographie de l'overlay programmé en X et en Y entre le niveau Cut et l'Active en Y.

La Figure 3.16 montre les positions des mesures optiques et SEM. Quatre puces différentes composent le champ, la disposition des SRAM mesurées (disques mauves) varie donc

au sein du champ. Au total 14 points sont mesurés au SEM par champ. D'autre part, 4 mires AIM sont disponibles aux quatre coins pour la mesure de l'overlay Cut - Active (Y) et 13 mires AIM sont réparties au sein du champ pour l'overlay Grille - Active (X).

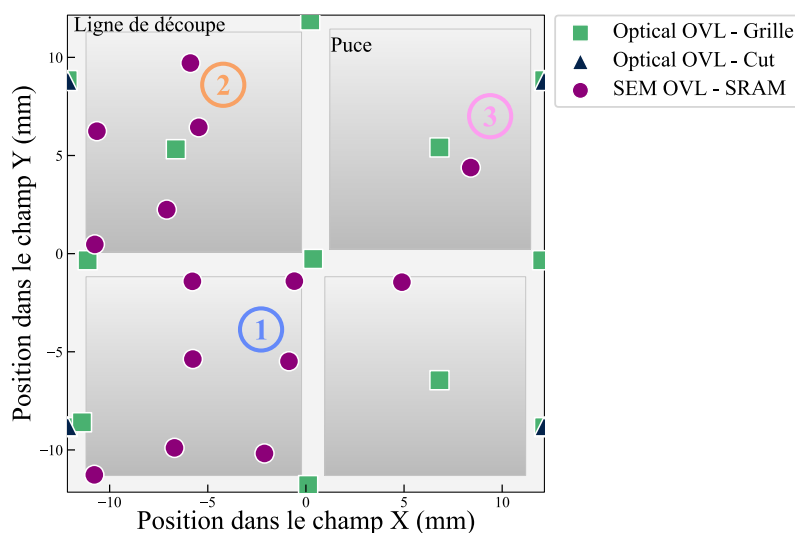


FIGURE 3.16 Cartographie des mires de mesure optique et des SRAM choisies. Les points (1), (2) et (3) correspondent aux positions SEM de la Figure 3.20.

Le motif unitaire choisi, représenté Figure 3.17, est composé d'un Pull-Up associé à deux grilles. Cette référence sera détectée dans l'image SEM et sera recalée sur les contours extraits dans le cadre de la mesure par la méthode BRR. La Figure 3.18 montre trois résultats de la mesure pour différentes valeurs d'OVL. Pour chaque image, jusqu'à quatre motifs unitaires sont détectés et mesurés via l'algorithme BRR : la mesure de l'OVL par motif unitaire est affichée dans l'encadré blanc, tandis que la référence recalée est représenté par des lignes en pointillés blancs. Ces mesures ont été réalisées sur l'ensemble de la plaque pour un total de 1358 points de mesure avec seulement 5% de mesures en erreur. Ce pourcentage relativement faible est prometteur et démontre une grande robustesse intrinsèque de l'algorithme BRR sur des structures très complexes telles que la cellule SRAM. Cependant, si certaines images comme la Figure 3.18b montrent une très faible variabilité sur plusieurs occurrences d'une même image, la Figure 3.18c montre une plus grande variabilité le long de l'axe X. Trois principales origines sont envisagées : la variabilité de fabrication, les distorsions de l'image SEM et les imperfections d'extraction du contour. L'extraction du contour est particulièrement complexe pour le niveau Active : ses motifs sont partiellement masqués par les grilles qui possèdent des bords très nets. De plus, la présence d'une marche

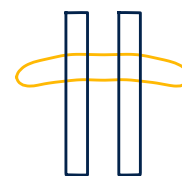


FIGURE 3.17 Motif unitaire.

entre la zone active et la zone isolante (cf. Figure 2.9) nuit à la netteté du contour. Afin de mitiger cette variabilité, la moyenne de la mesure sur l'image sera retenue.

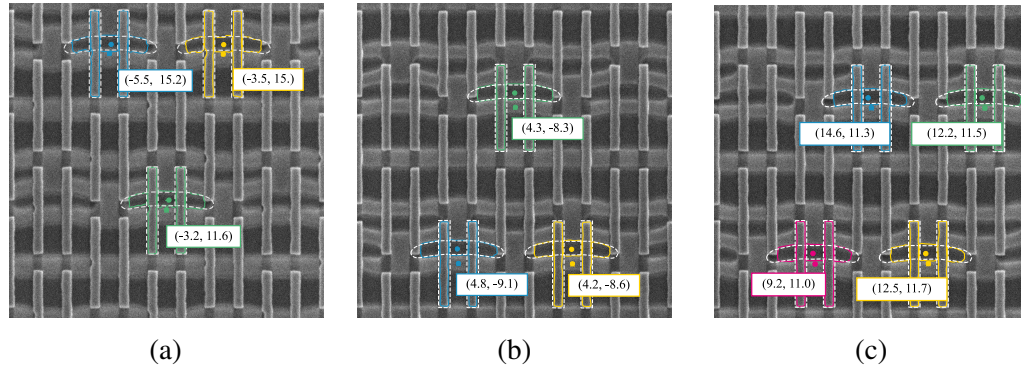


FIGURE 3.18 Trois exemples de mesures de l'overlay Grille - Active sur la SRAM par la méthode BRR. Chaque couleur correspond à une occurrence de la référence. Les contours extraits sont représentés en ligne continue tandis que la référence recalée est représentée en pointillés.

3.3.2 Comparaison avec les mesures de référence

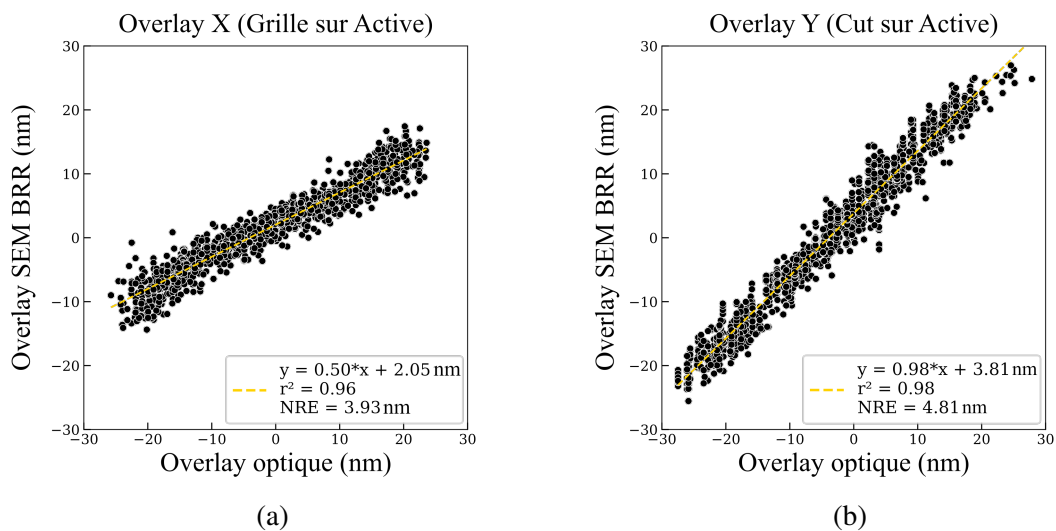


FIGURE 3.19 Corrélation de l'overlay mesuré par le SEM avec la mesure optique de la mire la plus proche.

La Figure 3.19 montre la corrélation entre les mesures SEM BRR et les mesures optiques de référence. Chaque mesure SEM est associée à la mesure optique la plus proche spatialement, et un point correspond à la moyenne sur une image. La régression linéaire donne une

pende de 0.5 et de 0.98 en X et en Y respectivement. Dans les deux cas, un biais est observé, de 2.05 nm et 3.81 nm ainsi qu'un NRE de 3.93 nm et 4.81 nm. Nous nous attendons à une pente de 1 pour les deux axes, il y a donc une perte de sensibilité selon l'axe X. Le biais indique lui un overlay systématiquement plus élevé dans la SRAM que sur la mire optique la plus proche. Ce biais doit cependant être étudié plus en détail afin d'assurer que ce n'est pas un artefact métrologique. Finalement le NRE est plus élevé que dans les cas précédents. Il est cependant du même ordre de grandeur que celui trouvé par K. Hasumi *et al.* lors d'une corrélation OVL optique à OVL SEM sur des mires dédiées et proches [63]. L'origine d'un NRE élevé est multiple : la variabilité de l'overlay, celle de la mesure, et enfin la distance entre les deux mires.

En effet, la Figure 3.20 montre l'influence de la distance sur le biais de la mesure pour trois positions différentes dans le champ. Chaque point de même couleur correspond à un point de mesure dans le champ, mesuré sur la centaine de champs de la plaque. Un biais différent par point est très net et la dispersion autour est plus faible que pour l'ensemble de points.

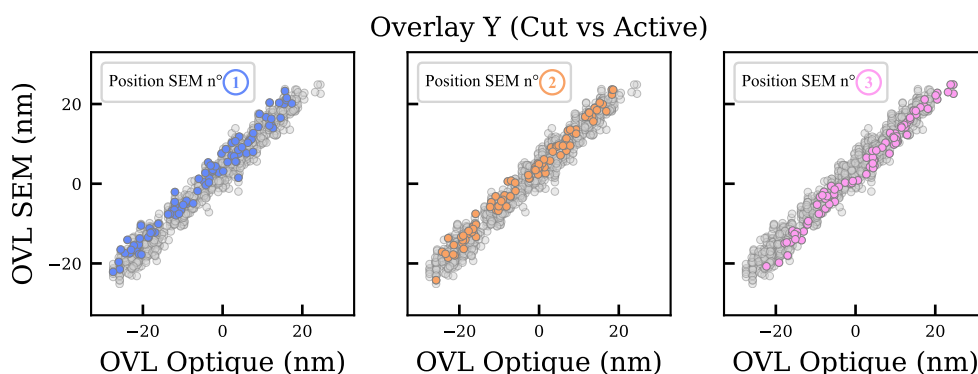


FIGURE 3.20 Chaque point de mesure a un biais vis-a-vis de la mire optique associé qui semble constant sur toute la plaque. Ce biais est expliqué par la distance séparant la mire du point de mesure. Les positions au sein du champ sont détaillées Figure 3.16

Pour mitiger cet effet, une solution est d'ajuster un modèle linéaire (6 paramètres) sur les mesures SEM, et de prédire la valeur de l'overlay selon ce modèle en la position des mires optiques. L'inverse serait aussi très intéressant, mais le faible nombre de mires selon l'axe X (4) ne permet pas une modélisation correcte par champ. La Figure 3.21 illustre l'amélioration permise par la prise en compte de cette distance. Le NRE en Y est amélioré de 1.1 nm et son coefficient de corrélation atteint 0.99. Pour l'axe X, l'amélioration n'est pas significative. En effet, comme nous allons en discuter dans le prochain paragraphe, la mesure en X est

principalement impactée par la qualité des bords verticaux visibles et non pas par la distance avec la mire optique.

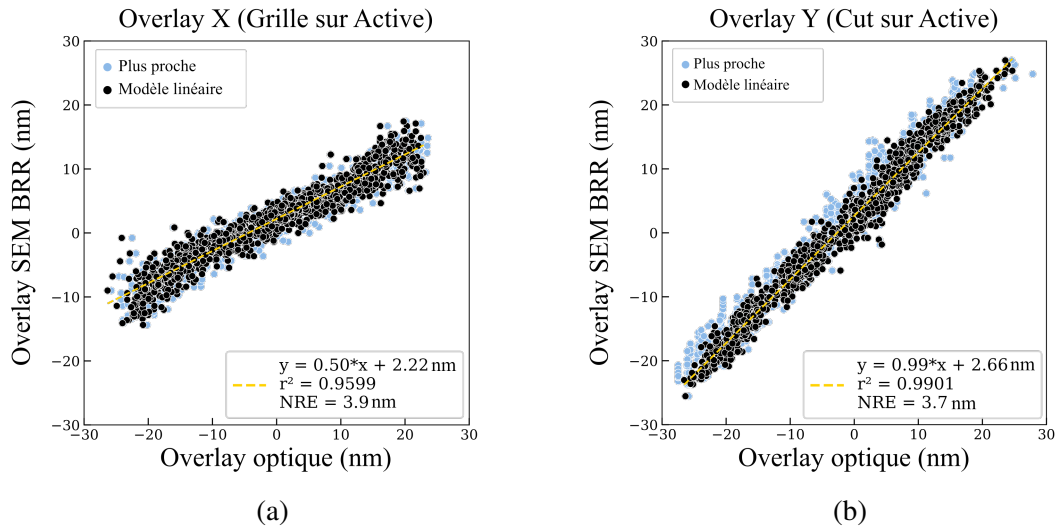


FIGURE 3.21 Corrélation de l'overlay prédit par le modèle SEM en la position de la mesure optique.

Le motif unitaire choisi dans cet exemple est composé d'un Pull-Up associé à deux grilles (Pull-Up Bas). Il est cependant possible d'utiliser d'autres motifs. Nous avons essayé avec le même motif tourné vers le haut (Pull-Up Haut), avec une référence comprenant deux Pull-Ups et cinq grilles (Symétrique), ou encore en rajoutant les lignes de l'active (Symétrique complet). Ces motifs sont illustrés 3.22 et leurs performances sont récapitulées Tableau 3.4.

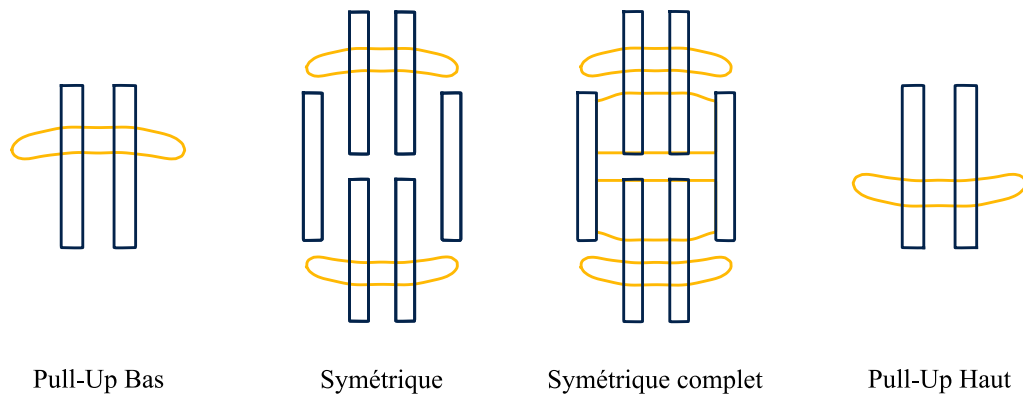


FIGURE 3.22 Différents contours de référence utilisés pour la mesure, résultats présentés Tableau 3.4.

Les performances selon l'axe X sont très dépendantes de la référence choisie. La pente demeure cependant faible et le NRE reste élevé. Les causes seront détaillées dans le prochain paragraphe. Les performances selon l'axe Y sont relativement bonnes et stables, avec un NRE compris entre 3.5 nm et 3.8 nm, un r^2 constant à 0.99 et une pente proche de 1. Seul le biais varie, tout en restant positif, entre 0.95 nm et 2.66 nm. Ces résultats démontrent une robustesse de la mesure selon l'axe Y et un faible impact du choix du motif mesuré. Cependant, nous observons un changement dans le biais, et donc un NZO influencé par la méthode de mesure.

Référence	Overlay X				Overlay Y			
	Pente	Biais (nm)	r^2	NRE (nm)	Pente	Biais (nm)	r^2	NRE (nm)
Symétrique complet	0.11	0.13	0.76	2.4	0.96	1.48	0.99	3.5
Pull-Up Haut	0.47	2.82	0.94	4.5	0.99	0.95	0.99	3.8
Pull-Up Bas	0.50	2.22	0.96	3.9	0.99	2.66	0.99	3.7
Symétrique	0.60	2.55	0.92	6.9	1.00	1.78	0.99	3.8

TABLE 3.4 Étude du choix de la référence : les métriques de pente, biais, coefficients de corrélations sont issues des corrélations avec la mesure optique selon la méthode détaillée précédemment. Chaque ligne correspond à une référence triées dans l'ordre croissant de sensibilité en X. La référence dite "Pull-Up Bas" correspond aux résultats présentés précédemment.

3.3.3 Évaluation expérimentale de l'incertitude

En production, l'incertitude de la mesure de l'overlay est mesurée à l'aide d'une procédure précise. La plaque est chargée et déchargée 3 fois dans l'équipement, et à chaque fois 17 sites sont mesurés 5 fois successivement. Au total, ce sont 15 mesures par site qui sont effectuées. Idéalement, les 3 séries sont effectuées à différents moments pour prendre en compte la reproductibilité de la mesure. Cette procédure ne prend pas en compte le TIS, l'erreur induite par un désalignement du système optique : lorsque la plaque est tournée de 180°, la mesure peut changer légèrement. Pour prendre en compte cet aspect, il est courant de réaliser une rotation de la plaque sur chaque mesure, ce qui monte le total à 10 mesures par site.

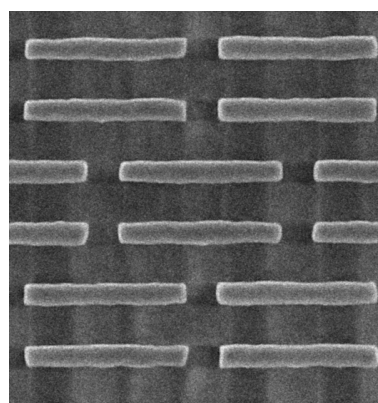


FIGURE 3.23 Électrification électrique dans la SRAM.

Cette procédure a été appliquée sur la mesure BRR de l'overlay selon l'axe Y dans la SRAM. Cependant, comme le montre la Figure 3.23, la prise d'image aux conditions utilisées fait face à des problèmes d'électrification des matériaux. Ce problème est bien connu lors de la qualification de la mesure CD par les SEM : la mesure dérive avec le chargement et une régression linéaire est effectuée pour prendre en compte cet aspect. Or ici, si les grilles restent parfaitement discernables, ce n'est pas le cas de la zone active où le contraste chute. L'utilisation de ces images pour la mesure génère donc une mesure très instable et l'incertitude mesurée est largement sur-estimée et est non représentative. Ce problème n'a pas été résolu et sera abordé dans les perspectives.

Pour pouvoir estimer l'incertitude, nous nous baserons sur les simulations physiques effectuées dans les sections précédentes. Nous considérons en particulier la simulation Section 3.1.3 qui possède des motifs et une qualité d'image similaires. L'incertitude de 0.8 nm est probablement légèrement sous-estimée, le TIS en particulier n'est pas pris en compte. Cette même valeur sera par ailleurs retrouvée dans la partie suivante Figure 3.26 où la mesure a été réalisée sur des images synthétique de SRAM.

3.3.4 Mise en évidence de l'impact des bords fixes

Pour expliquer l'origine de la perte de sensibilité et de la variabilité de la mesure en X, il est important de comprendre quelles informations sont utilisées pour le recalage. La Figure 3.24 illustre le cas de la SRAM. La mesure de l'overlay directe sur le produit va de pair avec la superposition des niveaux supérieur et inférieur. Le motif inférieur est divisé en plusieurs motifs individuels dont la forme dépend de l'overlay. Le contour de référence est recalé par minimisation de la distance avec le contour extrait. Les bords verticaux apportent donc une information sur l'overlay X et les bords horizontaux sur l'overlay Y.

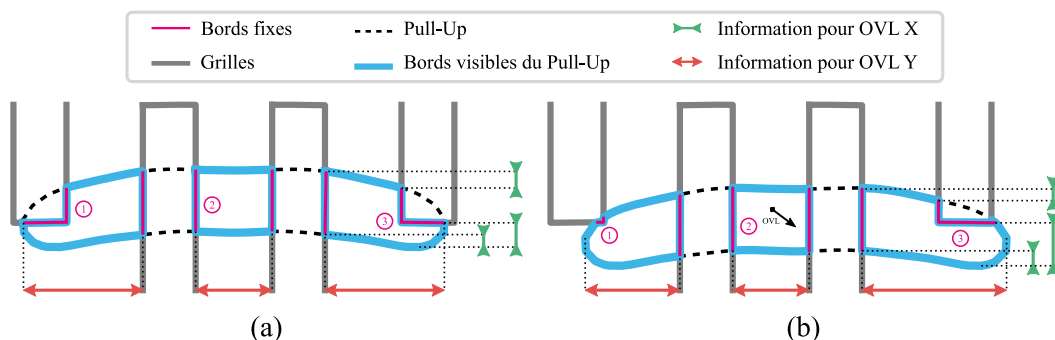


FIGURE 3.24 Schéma de la structure mesurée. L'information pour le recalage en X et Y correspond à la projection respectivement verticale et horizontale des bords extraits.

Or, sur ce motif les bords verticaux sont masqués. L'algorithme utilise en réalité seulement la courbure du Pull-Up pour faire son alignement selon X. La quantité de bords verticaux équivalente peut être représentée comme la projection de ces bords sur l'axe vertical (en vert). Il en est de même pour les bords horizontaux, qui ont une projection beaucoup plus élevée. Un deuxième élément explique la plus faible sensibilité de la mesure selon X. Certains bords de ces motifs extraits sont générés par la superposition avec la grille. On parle alors de bords fixes (en mauve), car la position de ces bords est figée indépendamment de la valeur de l'overlay. Les bords (2) ont par exemple tendance à freiner le déplacement de la référence lors du recalage, tandis que les bords (1) et (3) peuvent donner de fausses informations. Il est donc crucial de minimiser l'impact de ces contours. L'algorithme de recalage CPD est peu sensible aux bords (2) par construction, cependant les bords (1) et (3) peuvent l'induire en erreur de quelques nanomètres.

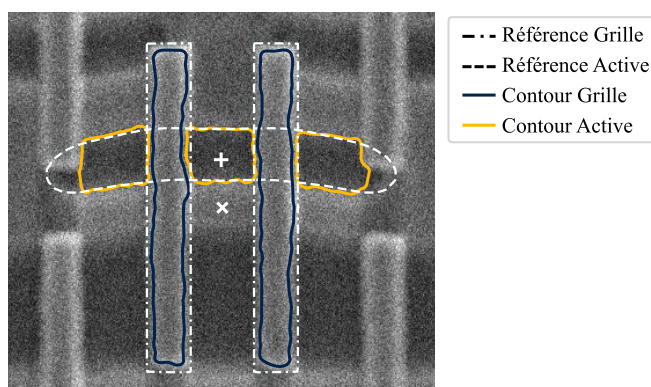


FIGURE 3.25 Contour extrait d'une cellule SRAM et sa référence recalée lors de la mesure par la méthode BRR.

Ce deuxième élément est clairement visible sur la Figure 3.25. Les bords horizontaux sont proprement extraits, tandis que de nombreux artefacts d'extraction de contour sont présents sur les bords verticaux. La majorité des bords sont fixés par la grille, et donc apportent une fausse information à l'algorithme de recalage qui devient prépondérante. L'extraction du bout des Pull-Up est très complexe à cause de l'effet d'ombrage induit par les grilles. De plus, la présence et la taille de ces portions de l'Active dépend de l'overlay natif. Cela peut induire ou renforcer des artefacts lors de l'extraction de contours, conduisant ainsi à de faux overlay. Le choix a été fait de ne plus les extraire et de couper verticalement le long de la grille pour favoriser une extraction de contour consistante.

3.3.5 Validation de l'hypothèse sur images synthétiques

Pour vérifier l'hypothèse des bords fixes, nous avons utilisé des images synthétiques générées à l'aide de Nebula. La première étape a consisté à reproduire les résultats précédents : simulation de l'empilement, ajout d'overlay, simulation des images synthétiques, mesure à l'aide de l'algorithme. Cette étape est un succès comme le montre la Figure 3.26. Plus particulièrement, la Figure 3.26a montre une partie d'image SEM simulée, les contours extraits ainsi que les références recalées lors de l'utilisation de l'algorithme. La Figure 3.26b présente quant à elle la corrélation entre la mesure BRR et l'overlay programmé. Similairement aux expériences précédentes, 100 images avec de l'OVL compris entre -30 nm et +30 nm ont été générées.

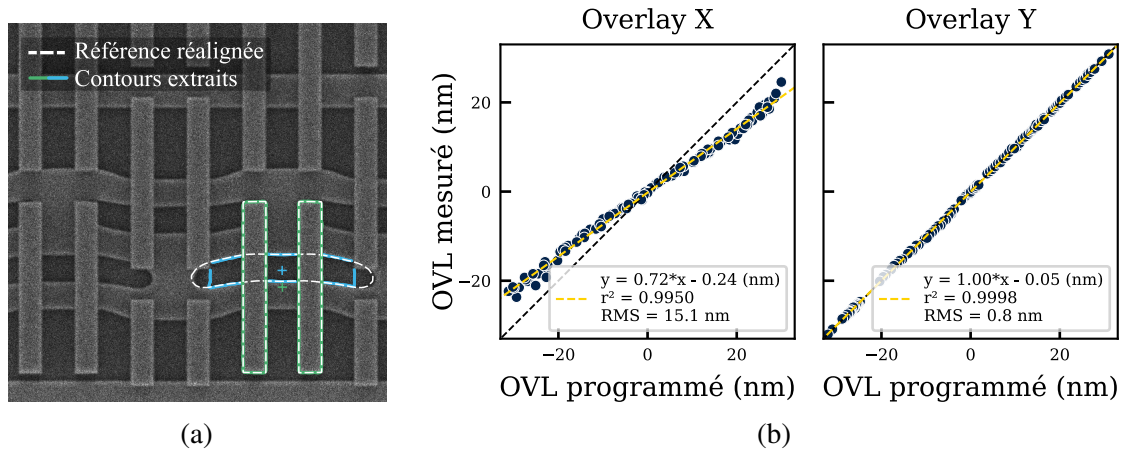


FIGURE 3.26 Corrélation de l'overlay mesuré par le SEM avec la valeur prédite par le modèle linéaire optique.

Deux conclusions peuvent être tirées de ces résultats. Premièrement, l'OVL selon l'axe Y est parfaitement mesuré, avec une corrélation similaire à celle dans les cas d'images synthétiques précédents. Deuxièmement, nous retrouvons la perte de sensibilité selon l'axe X. La qualité des images SEM, et des extractions de contours sur des bords parfaits donnent une pente de 0.72, bien inférieure à 1.

Ensuite, nous avons amélioré l'algorithme BRR et la recette d'extraction de contours afin d'enlever les bords fixes. Pour cela nous distinguons deux types de bords fixes : ceux provenant de la superposition des grilles avec la zone active et ceux provenant d'artefacts de l'extraction de contour. La Figure 3.27 illustre l'amélioration des performances de la mesure le long de l'axe X au fur et à mesure des modifications. Les bords fixes générés par la superposition des grilles ont été retirés à l'aide d'une zone d'exclusion autour des grilles (2). Cette première amélioration donne un résultat surprenant : il semble y avoir un couplage entre l'overlay Y et la mesure de l'overlay X. La mesure de l'OVL en X est correcte lorsque

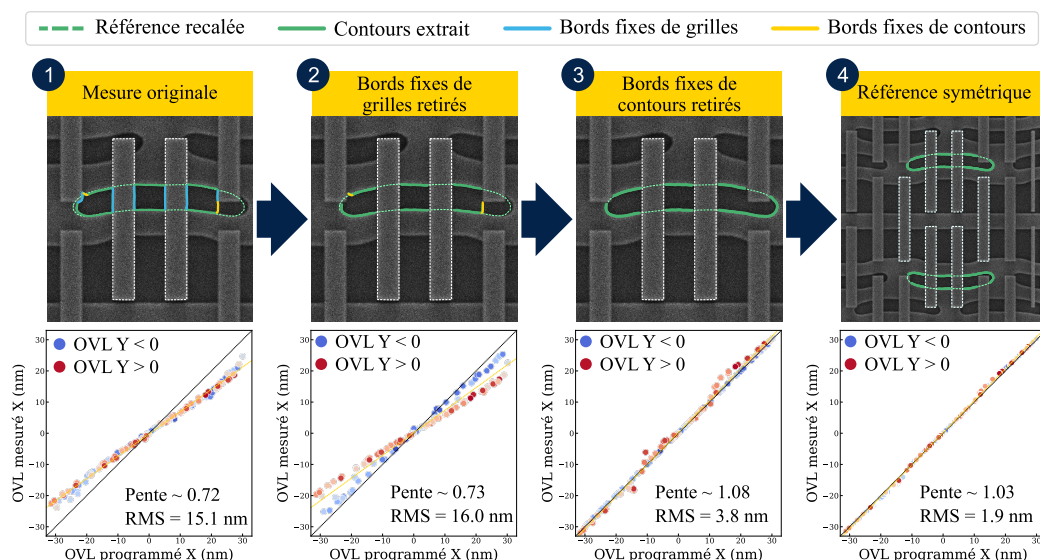


FIGURE 3.27 Améliorations successives des performances de l'algorithme de recalage en retirant les bords fixes.

l'overlay Y est négatif mais est dégradée lorsque ce dernier est positif. En effet, lorsque l'OVL Y est négatif, l'ensemble du Pull-Up est masqué par les grilles, il n'y a pas de bords fixes générés par le contour. Une amélioration de l'extraction de contour, facilitée sur ces images synthétiques, permet alors de supprimer ces bords fixes et de prendre l'ensemble des bords visibles du Pull-Up (3). Les résultats sont améliorés, mais présentent toujours des irrégularités lorsque l'overlay en Y est positif. Pour mitiger cet effet, le motif de référence symétrique comprenant deux Pull-Ups de sens opposés est utilisé (4). La corrélation est alors bonne, avec une pente de 1.03, un biais proche de 0 nm, un r^2 de 0.9994 et une erreur RMS de 1.9 nm. À noter que les performances selon l'axe Y demeurent stables avec les améliorations.

Pour conclure, nous montrons ici que la faible pente selon X dans la SRAM est bien une perte de sensibilité et non un effet process. Il est notamment possible d'obtenir une pente de 1. Pour cela il faut éliminer les artefacts d'extractions de contours que l'on nomme "bords fixes". Cela nécessite une amélioration de la qualité d'image ainsi qu'une modification de l'algorithme d'extraction de contours.

3.3.6 Extraction de contour bi-niveaux

Afin de mettre en application les effets démontrés dans la partie précédente, une nouvelle extraction de contour a été développée conjointement avec l'entreprise ASELT. Cette extraction, illustrée Figure 3.28 est dédiée aux images SEM où deux niveaux d'intérêt sont

visibles. L'algorithme va dans un premier temps extraire le niveau supérieur, puis extraire le niveau inférieur. Lorsque les jauges d'extraction sont situées à proximité voire sous le niveau supérieur, l'algorithme n'extrait pas cette partie, ce qui permet de limiter les artefacts.

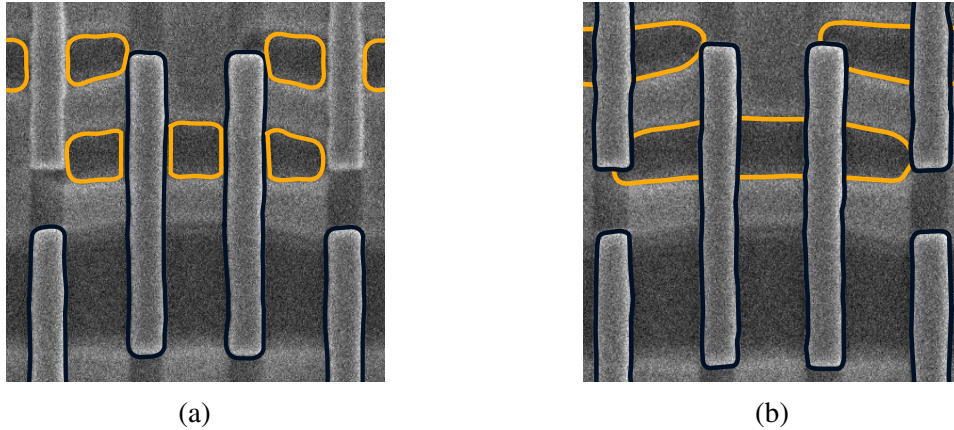


FIGURE 3.28 (a) Extraction de contour SIMPL utilisées pour les travaux précédents. (b) Extraction développée spécialement par Aselta pour les contours bi-niveaux.

Ces nouveaux contours, plus performants, permettent de retirer les bords fixes générés lors de l'extraction de contour comme dans le cas (3) de la Figure 3.27. Les bords fixes générés par la superposition du niveau supérieur sont quant à eux retirés de la même manière que précédemment, via une zone d'exclusion autour des grilles. Grâce à la compatibilité de l'algorithme BRR avec toute sorte de contours, l'algorithme a été appliqué sur ces nouveaux contours extraits par Aselta sur le même set d'images. En parallèle, une alternative a été développée conjointement avec Aselta. La Figure 3.29 montre les résultats, en X, des deux solutions sur ces nouveaux contours.

Contrairement aux résultats de la partie précédente sur les images synthétiques, BRR montre toujours une influence croisée de l'overlay Y sur la mesure de l'overlay X. L'utilisation du motif symétrique permet de s'affranchir de cette influence, mais donne des mesures très bruitées (NRE de 12.8 nm). Le nouvel algorithme alternatif semble prometteur : la pente de 0.94 s'approche de 1 même si le NRE demeure très élevé à 6.5 nm. Il serait intéressant de quantifier l'incertitude sur cette mesure, mais un tel NRE laisse à penser qu'elle sera élevée. Malgré l'amélioration de l'extraction de contour et de l'algorithme, la SRAM ne semble pas présenter suffisamment de bords verticaux pour permettre une mesure fiable selon l'axe X avec cette qualité d'image. Finalement, développé et testé uniquement sur la structure de la SRAM, il serait intéressant d'évaluer les performances et la polyvalence du nouvel algorithme sur d'autres motifs.

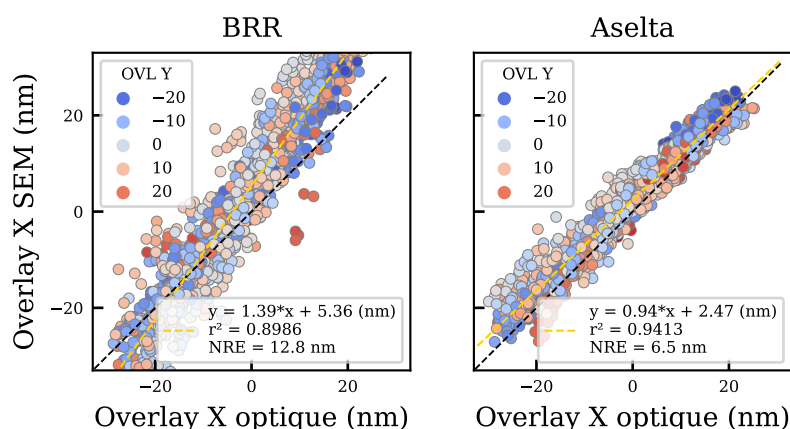


FIGURE 3.29 Améliorations des corrélations en X permises par le contour bi-niveaux avec la méthode BRR (motif symétrique) et avec la méthode alternative développée conjointement par Aselta.

L'essentiel

Cette section correspond à la **première application de l'algorithme BRR** sur des images réelles de **motifs du produit**. Sur une plaque de la ligne de production, de l'overlay d'une amplitude comprise entre -20 nm et +20 nm a été programmé à l'aide du scanner de lithographie. 14 points ont été mesurés au SEM par champ, directement sur la SRAM. Les mesures ont été **corrélées avec les mesures IBO**. La distance entre les mirettes optiques et SEM, de quelques millimètres, a été prise en compte à l'aide d'une modélisation linéaire de l'overlay par champ. Ces premières corrélations ont montré de **bons résultats selon l'axe Y**, et cela indépendamment du motif de référence utilisé. La mesure selon l'**axe X est cependant dégradée, a priori** à cause de bords dits fixes. Pour vérifier notre hypothèse de bords fixes générant cette perte de sensibilité, nous avons **reproduit l'expérience numériquement** avec des images SEM générées par Nebula. La perte de sensibilité est retrouvée selon X et l'algorithme ainsi que l'extraction de contour ont été améliorés itérativement afin de retirer ces bords fixes. Une bonne corrélation sur image synthétique a été obtenue et une incertitude de 1.9 nm peut être espérée. Finalement, l'application de ces améliorations sur les images réelles n'a pas donné d'aussi bons résultats. Un algorithme alternatif, dédié à la mesure de l'overlay dans la SRAM, a par ailleurs été développé conjointement avec Aselta. Ce dernier présente des résultats prometteurs, mais sa variabilité selon l'axe X semble elle aussi élevée.

Cette expérience a permis de montrer les limites de l'algorithme BRR et de développer les bonnes pratiques d'utilisation. L'objectif du prochain chapitre sera de l'appliquer sur des motifs moins complexes du produit, de préférence symétriques et possédant plus de bords verticaux et horizontaux, afin de quantifier la variation de l'OPO et le NZO au sein de la puce.

3.4 Conclusions

Ce chapitre s'est concentré sur l'évaluation et sur l'amélioration des performances de l'algorithme de mesure de l'overlay par Barycentre d'une Référence Réalignée (BRR).

Une première étape **d'optimisation de l'algorithme de recalage a mené au choix de l'algorithme CPD**. Basé sur la minimisation de la distance entre deux nuages de points associés de façon probabiliste, cet algorithme est robuste aux minimums locaux et offre une complexité relativement faible.

Ensuite, les **performances de la mesure BRR** ont été évaluées sur des **images SEM synthétiques à overlay connu**. De très bonnes corrélations, avec des **RMS inférieurs au nanomètre** ont été démontrées même lorsque le motif du niveau inférieur est partiellement masqué. La **stabilité de l'algorithme** vis-à-vis du bruit de l'image, du choix de la taille du pixel et la robustesse vis-à-vis de la rugosité ont été démontrés. En particulier, la mesure de l'overlay est stable pour des tailles de pixels inférieurs à 4 nm sur des motifs de dimensions similaires à ceux de la puce. Il semblerait cependant qu'un **pixel plus petit permette un RMS plus faible**.

Puis, les mesures de l'algorithme ont été comparées à celles données par le SEM et par l'instrument optique sur des mires AIM. Un **léger biais avec l'overlay programmé**, inférieur au nanomètre a été démontré. Ce biais est par ailleurs plus élevé sur la mesure SEM de référence. De plus, la **variabilité de l'overlay au sein de la mire Advanced Imaging Metrology** a pu être évaluée. Alors que la mesure optique ne renvoie qu'une valeur par mire, la mesure SEM a montré une valeur moyenne similaire à celle-ci, mais avec une variabilité de 0.63 nm à 3σ . La mesure SEM est en effet **plus sensible aux variabilités locales** de l'overlay et à la rugosité des motifs.

Enfin, l'algorithme BRR a pu être appliqué sur le **cas complexe de la SRAM**. Une bonne corrélation a été obtenue avec l'overlay optique selon l'axe Y. Les mesures ne corrélaient cependant pas parfaitement selon X. La **faible longueur de bord disponible** selon l'axe vertical ne permet en effet pas une mesure robuste. Malgré des **améliorations de l'algorithme sur des images synthétiques de SRAM** et une démonstration de la faisabilité, **l'algorithme ne permet pas la mesure selon cet axe** avec les conditions d'imagerie actuelles. De premières conclusions sur l'OPO et le NZO peuvent être apportées grâce à la mesure en Y. Premièrement un biais est présent entre la mesure SEM et la mesure optique et est **dépendant du choix du motif** mesuré. Deuxièmement, la mesure SEM sur la SRAM montre un NRE de 3.7 nm vis-à-vis de la mesure optique. Nous avons démontré une incertitude de 0.8 nm sur images synthétiques. Nous pouvons donc estimer une variabilité locale de l'overlay au sein de produit de l'ordre de $3\sigma = \sqrt{3.7^2 - 0.8^2} = 3.6 \text{ nm}$ par rapport à la valeur prédite par le

modèle optique. Pour une valeur optique modélisée de 5 nm, l'overlay réellement sur la plaque sera contenu dans l'intervalle 5 ± 3.6 nm.

Pour conclure, nous avons répondu à notre premier questionnement (cf. Section 1.4.2 page 47) : Oui, **il est possible de mesurer l'On-Product Overlay (OPO)** avec les outils et équipements SEM actuellement disponibles à STMicroelectronics. Nous en avons cependant aussi **démontré les limites** : contrainte forte sur les niveaux mesurables, nécessité d'un algorithme complexe pour compenser les faibles tensions d'accélération, importance du choix du motif observé, et faible débit de mesure.

Chapitre 4

Application industrielle de la métrologie overlay SEM

Introduction de chapitre

Après avoir qualifié et mis en évidence les limites de la mesure basée sur le Barycentre d'une Référence Réalignée, ce quatrième chapitre propose des premières applications industrielles de la mesure SEM-OVL au sein de STMicroelectronics. L'objectif est de répondre aux problématiques 2 et 3 présentées Section 1.4.2 : Comment l'*On-Product Overlay* (OPO) varie-t-il au sein d'une plaque, d'un champ et quelle est l'amplitude du *Non-Zero Offset* (NZO) ?

Les algorithmes de mesure d'overlay BRR (Barycentre d'une Référence Réalignée) et BCE (Barycentre du Contour Extrait) seront utilisés pour réaliser une **mesure dense au sein d'un produit** de la ligne de production. Dans un premier temps ces mesures seront comparées aux mesures optiques et seront analysées selon leur distributions. **Une signature de l'overlay par puce** de faible amplitude sera par ailleurs démontrée. Dans un second temps, deux cas d'utilisations industrielles de ces mesures SEM seront abordés. Nous utiliserons d'abord les mesures précédentes pour réaliser **un modèle de correction hybride**, comprenant des mesures optiques et SEM. Ces travaux ont par ailleurs été publiés en 2023 [125]. Puis nous montrerons qu'il est possible d'implémenter la mesure OVL sur les images SEM prises pour la mesure CD afin de réaliser un **suivi en ligne du NZO et de l'OPO**.

Enfin, nous profiterons d'une excursion sur la ligne de production de STMicroelectronics pour comparer les différentes mires d'OVL optiques. Pour cela, nous aurons à disposition une mesure SEM OVL effectuée sur des équipements dédiés permettant l'utilisation de **hautes tensions et des capteurs d'électrons retro-diffusés** (BSE) afin de mesurer l'overlay entre les niveaux Grille et Contact directement dans la SRAM.

4.1 Mesures denses de l'overlay dans le produit

4.1.1 Plan d'expérience

L'objectif de cette section est de mesurer l'overlay, de manière dense, dans le produit d'une puce de la ligne de production de STMicroelectronics. Pour cela, un produit particulier a été sélectionné. Sa configuration est représentée Figure 4.1a. Chaque champ contient 49 puces, et chacune de ces puces contient 16 répétitions d'un bloc analogique réparties de manière symétrique (rectangles jaunes). La multitude de puces et la répétition de blocs au sein de la puce facilitent la création des recettes SEM : chaque motif sélectionné au sein du bloc analogique représente 16 points de mesures par puce et un potentiel de 784 points de mesures par champ.

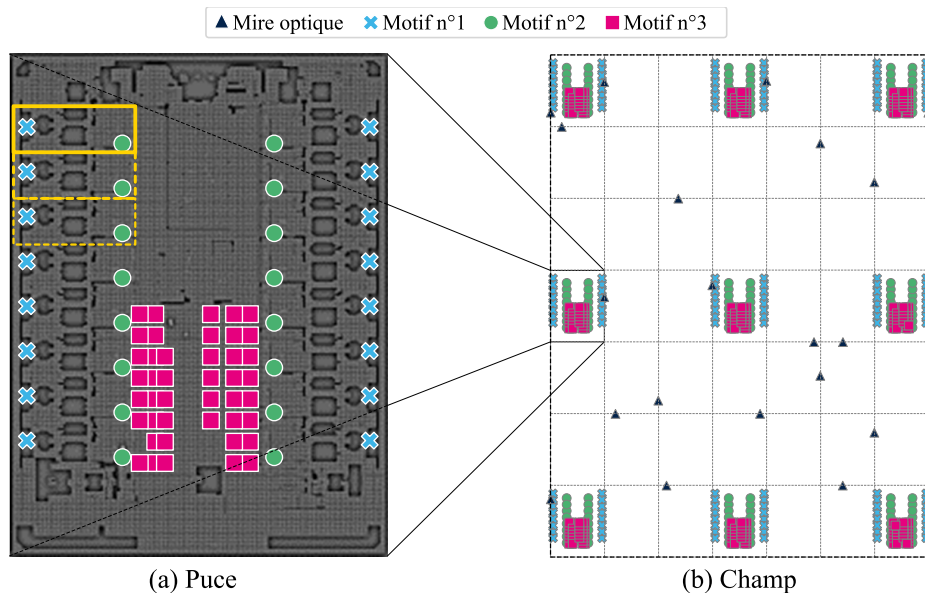


FIGURE 4.1 Cartographie des mesures au sein d'une puce (a) et d'un champ (b).

L'échantillonnage spatial des mesures au sein d'une puce et d'un champ sont représentés Figure 4.1. Trois motifs de mesure SEM sont sélectionnés. Les deux premiers sont situés dans ces blocs analogiques et permettront une cartographie uniforme de la puce. Le troisième est quant à lui sélectionné au sein du bloc logique où la densité de motifs est plus élevée. L'intérêt de ce troisième motif est d'estimer la variabilité locale de l'overlay et d'identifier un possible effet de densité sur l'overlay. Pour cela, 43 points ont été sélectionnés sur une surface d'environ 1 mm^2 . Les mesures sont illustrées Figure 4.1b et leur répartition est détaillée Tableau 4.1. Au total ce sont 1926 sites qui sont mesurés. Contrairement aux travaux de la Section 3.3 page 92, seul l'overlay entre la lithographie Grille et la lithographie Active

sera mesuré. La mesure de l'overlay optique est effectuée par IBO sur les 21 mires AIM cartographiées Figure 4.1b. Les deux algorithmes BCE et BRR seront appliqués sur les motifs n°1 et n°2, tandis que seule la mesure BRR est applicable sur le motif n°3 à cause de la présence de la lithographie Cut.

TABLE 4.1 Échantillonnage de mesure par motif.

Motif	Mesures par puce	Puces par champ	Champs	Total
n°1	16	9	4	576
n°2	16	9	4	576
n°3	43	9	2	774

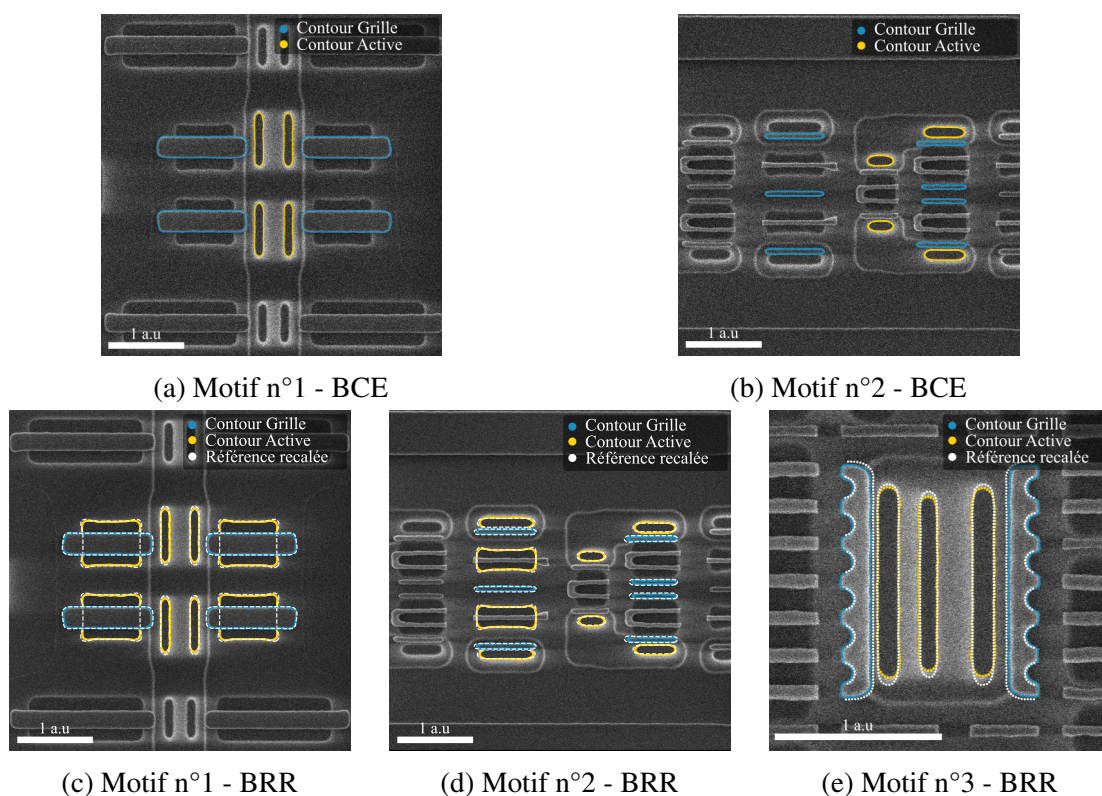


FIGURE 4.2 Mesure de l'overlay à l'aide de l'algorithme BCE sur le motif n°1 (a), n°2 (b) et de l'algorithme BRR sur le motif n°1 (c), n°2 (d) et n°3 (e). Les cercles rouges sur (e) identifient des nœuds retirés sur la référence pour enlever l'influence de la lithographie Cut lors du recalage.

Les motifs mesurés sont présentés Figure 4.2. Quatre critères principaux ont été utilisés pour le choix de ces motifs :

1. Présence d'éléments entièrement visibles pour la mesure BCE ;

2. Absence de lithographie Cut (cf. Section 3.3 page 92) dans la définition des grilles ;
3. Quantité de bords suffisamment élevée ;
4. Facilité de création de recette SEM.

Les motifs 1 et 2 cochent tous ces critères. Leurs mesures à l'aide des algorithmes BCE et BRR sont représentées dans les encarts a, b, c et d de la Figure 4.2. L'utilisation du recalage de la référence, en particulier sur le motif n°1, permet la prise en compte de plus d'éléments et donc d'une plus grande longueur de bords que lors de la mesure BCE. De plus, la longueur de bords disponibles sur le motif n°2 est plus faible, nous nous attendons donc à une mesure plus bruitée. Enfin le motif n°3 (Figure 4.2e) ne répond pas à tous les critères. En effet, dans le bloc logique, il est très dur de trouver un motif répété car les transistors sont générés automatiquement à l'aide d'outils informatiques. La prise caisson, correspondant au motif n°3, forme une matrice répétée au travers du bloc et est donc un candidat idéal. Cette structure est définie par les deux lithographies Cut et Grille. Il est donc impossible d'y appliquer l'algorithme de mesure BCE. La mesure à l'aide de BRR est elle aussi compliquée car les bords extérieurs des grilles sont définis par la lithographie Cut. Pour empêcher l'algorithme de recalage d'utiliser ces bords, les nœuds de la référence correspondants à la lithographie Cut sont retirés au préalable. Les cercles rouges de la Figure 4.2e identifient deux des ensembles de nœuds enlevés.

Les images SEM sont prises sur les CD-SEM CG5000 de Hitachi avec une tension d'accélération de 800 V, un courant de 8.0 pA, une vitesse de balayage de 2xTV, une taille de pixel de 2.34 nm pour les motifs 1 et 2, de 1.88 nm pour le motif n°3, et une intégration de 32 balayages par image. Les recettes SEM ont été générées hors ligne à l'aide des outils de l'équipe OPC de STMicroelectronics (Recipe Director) afin de renseigner informatiquement les coordonnées de mesure ainsi que les rotations de scan nécessaires pour prendre en compte la symétrie de la puce. Les contours de référence utilisés pour le recalage dans l'algorithme BRR sont issus des simulations post-lithographie effectuées par cette même équipe OPC.

4.1.2 Analyse des mesures brutes

Dans un premier temps les mesures peuvent être analysées selon leur distribution. Celles-ci sont représentées Figure 4.3. Les distributions des mesures SEM par la méthode BCE sur les motifs 1 et 2 sont similaires à celle obtenue par la mesure optique sur les mires AIM. En particulier, les mesures SEM ont un écart type plus élevé de quelques dixièmes de nanomètres, et un écart dans la moyenne de 1.9 nm et 1.2 nm selon l'axe Y pour les motifs 1 et 2. En revanche si la mesure BRR sur le motif n°1 montre une distribution similaire à celle mesuré par la méthode BCE, la différence est marquante pour le motif n°2. La mesure sur

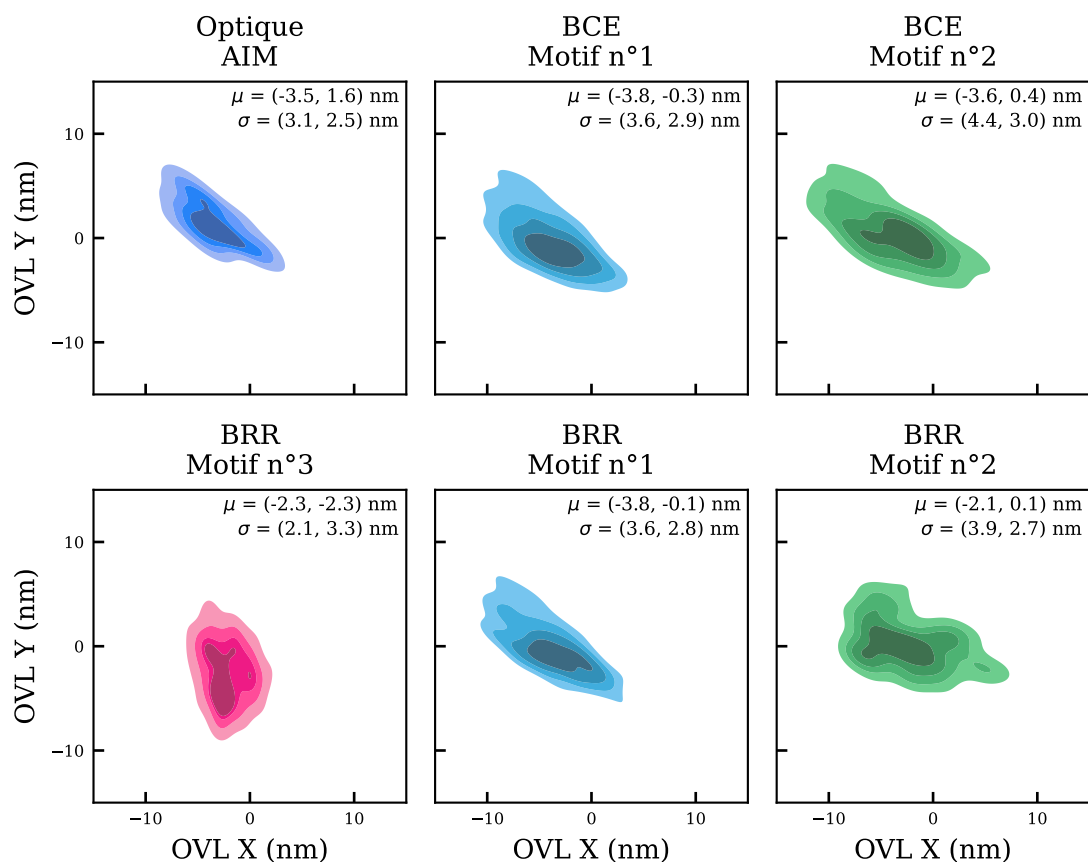


FIGURE 4.3 Distribution des différentes mesures : optique, SEM sur les motifs n°1, n°2 et n°3. La moyenne (μ) et l'écart-type (σ) de l'ensemble de la distribution sont donnés dans le coin haut droit de chaque graphe sous la forme (X, Y).

le motif n°2 par l'algorithme BRR semble tomber dans des minimums locaux en X. Sauf indication contraire, les mesures utilisées sur les motifs n°1 et n°2 seront donc celles basées sur la méthode BCE (Barycentre du Contour Extrait). Le motif n°3 montre quant à lui une distribution différente, avec une moyenne centrée en (-2.3 nm, -2.3 nm) et un écart-type faible (2.1 nm) relativement aux autres mesures.

La Figure 4.4 montre les cartographies des différentes mesures overlay. Les mesures par la méthode BCE sur les motifs n°1 et 2 présentent des tendances similaires à celle observée par la mesure optique, tandis que la mesure sur le motif n°3 montre une signature différente. Nous confirmerons et expliquerons ces observations dans les prochaines sections à l'aide de corrélations et de modélisations.

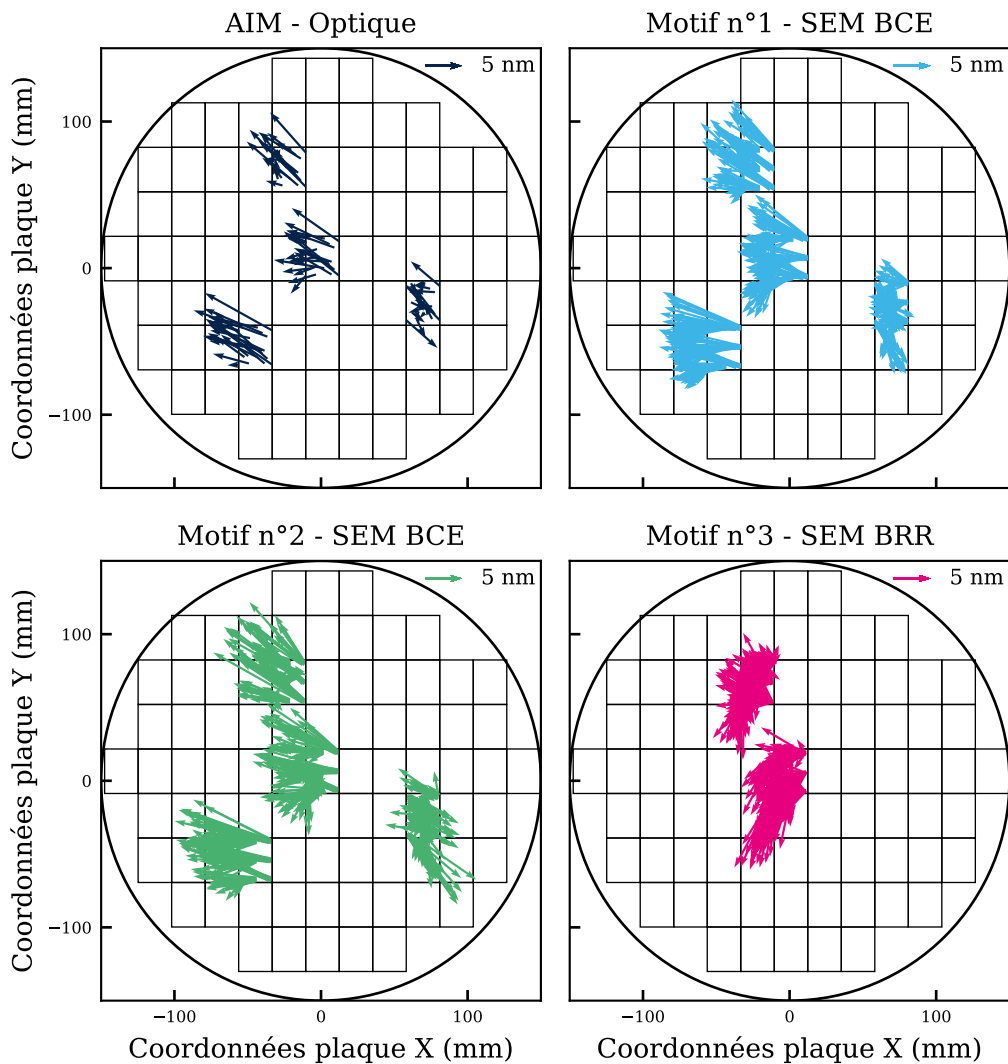


FIGURE 4.4 Cartographie des résultats bruts des mesures overlay sur les différents motifs. En bleu marine, la mesure optique sur les mires AIM, en cyan et vert la mesure SEM BCE sur les motifs n°1 et n°2, en magenta la mesure SEM BRR sur le motif n°3.

4.1.3 Corrélations avec la mesure optique

Dans cette partie, nous évaluons la corrélation entre l'overlay SEM et l'overlay optique afin d'observer les possibles biais et variations de l'overlay au sein du produit.

La Figure 4.5 montre la corrélation entre la mesure SEM BCE sur le motif n°1 et la valeur prédite par le modèle optique ajusté sur les 21 points de mesure du champ (cf. Section 3.3.2 page 95). L'ensemble des corrélations peut être retrouvé Annexe A, les métriques correspondantes sont résumées Tableau 4.2.

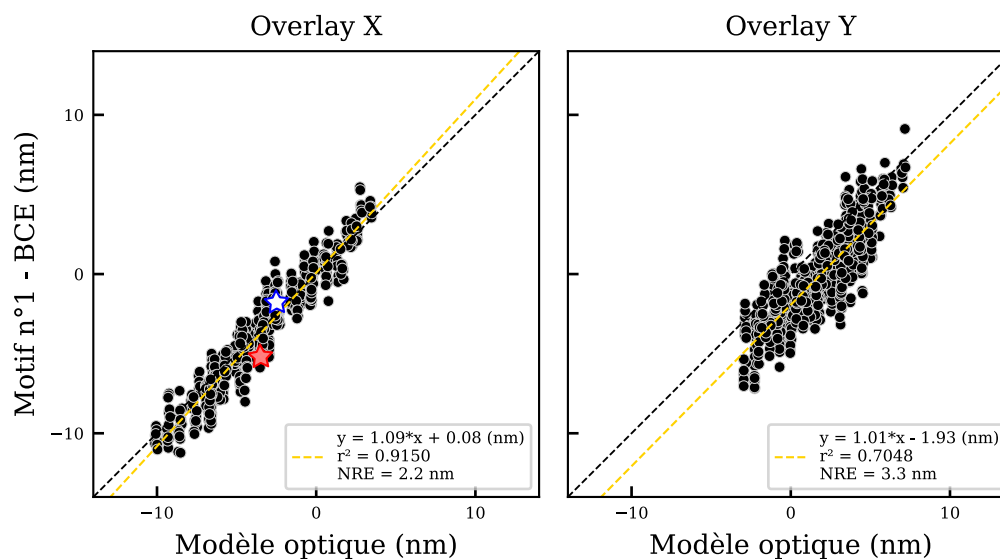


FIGURE 4.5 Corrélation de la mesure SEM via l'algorithme BCE avec la valeur prédite par le modèle optique. Les deux étoiles correspondent aux cas particuliers étudiés Figure 4.6.

TABLE 4.2 Métriques issues des corrélations entre les mesures SEM et optiques pour les différents algorithmes et motifs mesurés.

Algorithme	# motif	Overlay X				Overlay Y			
		Pente (nm)	Biais (nm)	r^2	NRE (nm)	Pente (nm)	Biais (nm)	r^2	NRE (nm)
BCE	1	1.09	0.08	0.9150	2.2	1.01	-1.93	0.7048	3.3
BRR	1	1.07	0.20	0.9196	2.1	1.02	-1.84	0.7584	2.9
BCE	2	1.27	0.95	0.8062	4.1	1.01	-1.26	0.6306	3.9
BRR	2	0.94	1.32	0.5462	5.6	0.97	-1.42	0.7035	3.2
BCE	3	-	-	-	-	-	-	-	-
BRR	3	0.67	0.29	0.5263	3.1	1.11	-4.46	0.6318	4.3

Le motif n°1 présente, pour les deux axes, une pente relativement proche de 1. Cela démontre une corrélation entre l'overlay présent sur le motif et sur les mires optiques. Cependant, il est intéressant de noter le décalage négatif le long de l'axe Y ayant déjà été observé dans les distributions Figure 4.3. La grille sur ce motif semble être constamment décalée d'environ 2 nm vis-à-vis des simulations post-lithographie. Cette tendance est également confirmée par le motif n°2 avec un décalage de -1.26 nm le long de l'axe Y avec la même méthode de mesure. En outre, la variabilité le long de l'axe Y semble être plus importante. Cette plus grande variabilité pourrait être attribuée à la plus faible quantité de bords horizontaux, pourtant le Tableau 4.2 montre une valeur similaire de NRE le long de l'axe Y pour le motif n°2 qui contient une quantité significative de bords horizontaux. À

noter que le sens de balayage est horizontal sur l'ensemble de ces images et favorise donc la mesure en X, son impact sur la mesure le long de l'axe Y n'a pas été étudié.

Les étoiles bleues et rouges dessinées sur la Figure 4.5 correspondent aux valeurs minimales et maximales observées par le SEM à l'intérieur de la puce (-3, 3) du champ central (0, 0). Ces mesures constituent un bon exemple de la variabilité locale de l'overlay sur le produit : alors que le modèle optique (6 paramètres) prévoyait une variation de 0.57 nm entre ces deux points de mesure rapprochés, le SEM a mesuré une variabilité 5 fois plus importante, avec une différence de 3.48 nm entre les deux mesures.

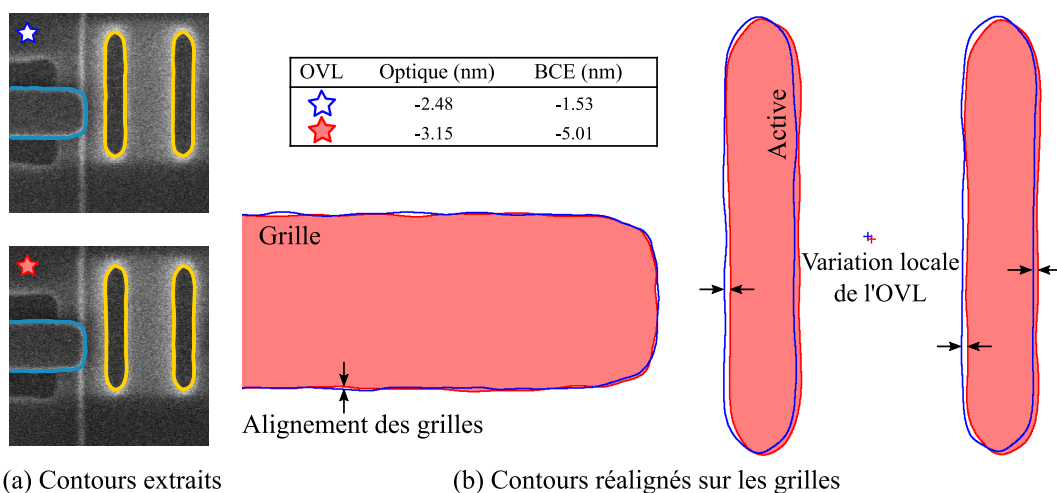


FIGURE 4.6 Illustration de la variabilité locale de l'overlay vue uniquement par le SEM. Les contours (a) de deux mesures proches montrant une différence d'overlay SEM de 3.48 nm ont été réalignés sur les grilles (b). La différence d'overlay perçue par le modèle optique CPE est quant à elle de 0.57 nm seulement.

Ce phénomène est illustré Figure 4.6 où les contours extraits sont présentés avec les images correspondantes. Pour visualiser cette différence, les deux contours ont été réalignés en minimisant la distance entre les contours de grilles. Ainsi, la variabilité de l'overlay peut être observée dans la différence de placement entre les contours du niveau Active. Cet exemple montre un intérêt majeur de la mesure de l'OVL au SEM : seul le SEM a la capacité d'observer la variation de l'overlay au sein de la puce à l'échelle locale.

Les mesures sur le motif n°3 n'ont pas vocation à être directement corrélées points à points aux mesures optiques. En effet, la mesure pour ce modèle est 3 à 4 fois plus dense que pour les motifs 1 et 2, un point de mesure optique sera corrélé à 49 points de mesure au sein d'un bloc logique. La Figure 4.7 trace les corrélations entre la moyenne par puce mesurée par BRR avec la prédiction du modèle optique.

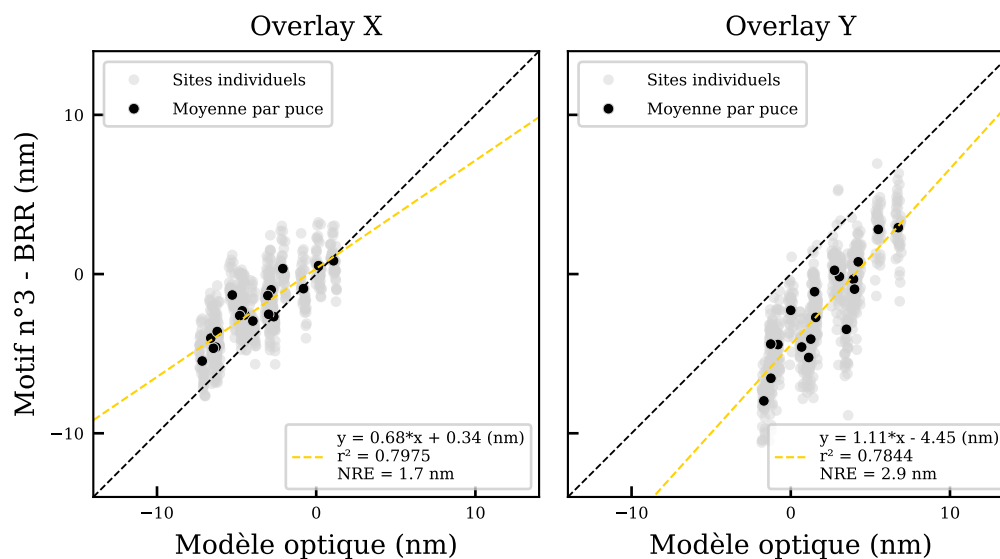


FIGURE 4.7 Corrélation des mesures moyenne par puce via BRR sur le motif n°3 avec la valeur prédite par le modèle CPE optique.

Le biais trouvé sur les corrélations avec les motifs précédents est de nouveau observé, de manière plus accentuée (-4.45 nm). On observe de plus une pente inférieure à 1 selon l'axe X. Après observations de différentes mesures, il semblerait que l'extraction de contour et que le recalage s'effectuent correctement. Cette faible variation de l'overlay en X semble provenir du procédé de fabrication et semble être réellement présente sur le produit : le bord intérieur de la grille repose sur le bord du NOSO situé en dessous. Ce bord vertical est donc influencé par le positionnement de ce niveau inférieur, ce qui réduit l'influence de l'overlay X induit lors de la lithographie Grille. De plus, le bord extérieur de ce motif est défini principalement par la lithographie Cut et seules les courbures sont définies par la lithographie Grille.

En conclusion, la comparaison directe entre les mesures SEM et les mesures optiques donne une estimation de la variabilité locale de l'overlay qui ne peut pas être observée via les mesures optiques. Les valeurs de l'On-Product Overlay (OPO) peuvent différer d'une amplitude de l'ordre de 3 nm à 3σ vis-à-vis des prédictions du modèle optique. De plus, nous avons montré un biais entre l'OVL mesuré sur la mire optique et celui vu par le SEM sur le produit. Ce NZO d'une amplitude d'environ 2 nm selon l'axe Y semble dépendre en partie du motif mesuré. Enfin, même si l'algorithme BRR vise à permettre de mesurer l'OVL sur tout motif partiellement masqué, nous mettons en évidence une fois de plus l'influence du choix de motif sur la qualité de l'analyse. L'empilement, la complexité des motifs et la quantité de bords disponibles sont les principaux facteurs contribuant à la fiabilité de la mesure.

4.1.4 Comparaison des algorithmes BRR et BCE

Dans cette partie nous comparons l'algorithme BRR à BCE. Moins complexe et basé directement sur la définition de l'overlay, la méthode BCE peut être utilisée comme référence. La Figure 4.8 compare les corrélations des mesures SEM par BRR et par BCE sur le motif n°1 avec le modèle optique. L'utilisation du recalage de la référence réduit le NRE le long de l'axe Y de 0.4 nm. En effet, comme le montre la Figure 4.2, l'utilisation des motifs partiellement masqués permet de prendre en compte davantage de bords horizontaux ce qui explique l'amélioration significative en Y. Par ailleurs, on peut noter une légère amélioration de 0.1 nm du NRE le long de l'axe X. Le recalage de la référence sur le contour permet ainsi de limiter l'impact de la rugosité et de la variabilité du contour.

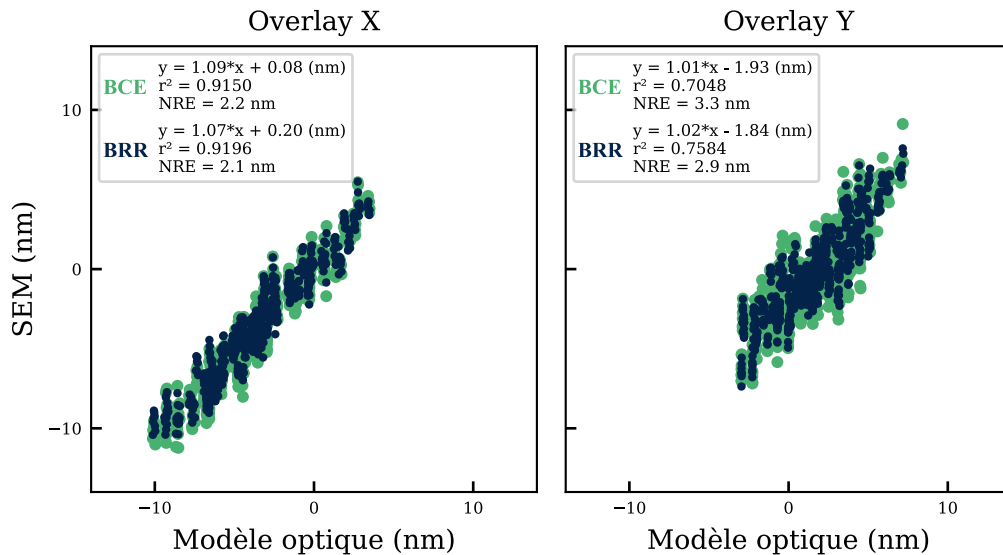


FIGURE 4.8 Comparaison des mesures BRR et BCE sur le motif n°1 vis-à-vis de la prédiction du modèle linéaire optique par champ.

De plus, les deux méthodes sont bien corrélées l'une à l'autre comme le montre la Figure 4.9. Un NRE relativement élevé de 0.8 nm et de 1.3 nm est cependant obtenu avec un biais de l'ordre de 0.1 nm. Comme les deux algorithmes ont été appliqués sur les mêmes images SEM, le NRE correspond à l'extraction de contour ainsi qu'à l'algorithme de mesure lui-même et n'inclut pas l'étape d'acquisition de l'image. Il est important de noter ici que les contours utilisés ne sont pas les mêmes, et que la mesure BRR utilise des bords supplémentaires à BCE.

Sur le motif n°2, si l'algorithme BRR permet aussi une réduction de la variabilité de la mesure selon Y, il ne permet pas d'amélioration similaire le long de l'axe X. Comme le

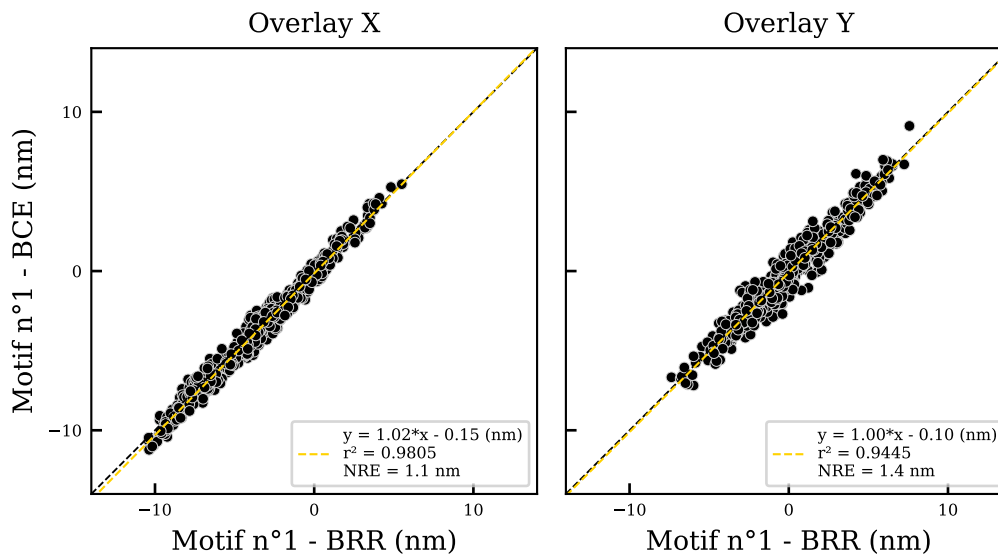


FIGURE 4.9 Corrélation des mesures BRR et BCE sur le motif n°1.

montre le tableau 4.2, même si la pente est plus proche de 1, nous obtenons un NRE important et un r^2 faible. Cela provient du recalage de la référence qui a tendance à tomber dans des minima locaux comme dans le cas de la SRAM. La faible quantité d'arêtes verticales sur cette image ne permet finalement pas une mesure aussi répétable en X que sur le motif n°1.

Pour conclure, comme dans le cas de la SRAM la mesure à l'aide de l'algorithme BRR améliore la qualité de la mesure lorsque la quantité de bords est suffisante. En revanche, comme le démontre la mesure selon l'axe X sur le motif n°2, l'algorithme tombe dans des minimums locaux si la longueur de bords est trop faible. Pour la suite de cette étude nous utiliserons les mesures effectuées par la méthode BCE pour maintenir une consistance. De plus, la faible quantité de bords et donc l'incertitude plus élevée selon l'axe Y pour le motif n°2 sera à prendre en compte pour l'interprétation des résultats.

4.1.5 Détermination d'une signature intra-puce

L'échantillonnage spatial de mesure présenté Figure 4.1 permet la mesure dense de l'overlay au sein d'une puce. Nous allons étudier ici la variation de l'overlay à cette échelle. Les composantes overlay à l'échelle de la plaque et du champ doivent être retirées afin d'observer uniquement les variabilités locales. Ainsi, pour chaque champ, un modèle overlay à 15 paramètres dit intra-field High Order Process Control (détaillé Équation 1.8 page 26) est ajusté pour chaque motif, comme dans le cadre d'une Correction Par Exposition (CPE). Une fois le modèle ajusté, l'overlay résiduel est obtenu comme la différence entre la mesure

et la valeur prédite par le modèle au même point. Pour plus de détails, ces étapes seront de nouveau détaillées dans la section 4.2.1 page 122. La Figure 4.10 représente pour chacun des trois motifs l'overlay résiduel mesuré sur les 36 puces après avoir enlevé les composantes plaque et champ. Pour visualiser les signatures moyennes de l'overlay au sein des puces, un modèle linéaire à 6 paramètres issus des Équations 1.6 et 1.7 est ajusté sur l'ensemble des mesures pour les trois motifs. Ce modèle est représenté par les flèches noires.

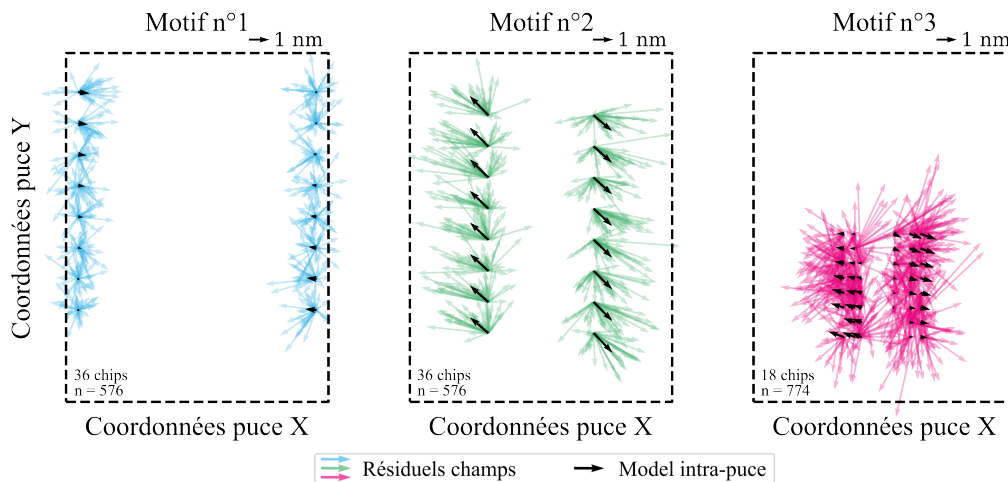


FIGURE 4.10 Mesures overlay SEM dans les puces où les composantes plaque et champ ont été retirées à l'aide d'un modèle iHOPC (en bleu, vert et magenta) et les modèles linéaires ajustés sur ces résiduels (en noir). Les puces mesurent 3.3 mm x 4.34 mm.

Tout d'abord le résiduel du modèle intra-champ iHOPC a une amplitude très faible. Pour les motifs 1, 2 et 3 la norme de l'overlay résiduel a respectivement une variation à 3σ de 1.51 nm, 2.17 nm et 2.83 nm. Le motif n°2 est celui dont le résiduel après modélisation par puce diminue le plus : le 3σ du résiduel est notamment diminué de 1.39 nm selon l'axe Y, soit 45% du résiduel du modèle par champ ! La tendance de cisaillement et de grandissement selon cet axe est en effet nettement visible sur ce motif, mais est aussi présent sur les autres. Le cisaillement pourrait être expliqué par la rotation de 180° du balayage du SEM lors de l'acquisition des images. Cependant, cette rotation du balayage n'a pas lieu sur le motif n°3 qui présente lui aussi ce léger cisaillement. Il semblerait alors que cette faible signature ne soit pas un artefact métrologique, mais soit bien présente sur chacune des puces. La densité des motifs, leur forme et leur position à l'intérieur de la puce pourrait être à l'origine de cette signature d'overlay locale de grandissement associé à un cisaillement vertical sur chaque puce. Un défaut dans l'écriture du masque est aussi envisageable. Il semblerait par ailleurs que la signature de l'overlay vue par le motif n°2 soit dépendante de la position de la puce dans le champ. En particulier, la signature est très similaire entre les puces d'une même

colonne dans le champ. Ce phénomène est particulièrement visible lorsque l'on observe les puces regroupées selon leur position dans le champ. Cette représentation est visible dans l'Annexe B.

Finalement, ces résultats sont à nuancer. L'amplitude des modèles linéaires par puce est du même ordre de grandeur que celle du résiduel. En norme et à 3σ , un gain de l'ordre de quelques pour-cents seulement est obtenu suite à l'ajustement du modèle. Autrement dit, la signature observée par puce est du même ordre de grandeur que la variation locale de l'overlay mesuré. Corriger cette signature aurait donc peu d'impact sur le rendement. Cette expérience nous a cependant permis d'obtenir un ordre de grandeur de la variation de l'overlay à l'échelle d'une puce et même d'un bloc de logique : l'overlay varie localement d'une amplitude de respectivement 1.5 nm et 2.83 nm à 3σ pour le motif n°1 et pour le motif n°3.

L'essentiel

Cette Section a été dédiée à la **mesure dense de l'overlay au sein du produit**. Pour cela un produit particulier a été choisi : chaque champ contient 49 puces, lesquelles ont un bloc analogique répété 16 fois de façon symétrique selon la verticale. Trois motifs distincts sont mesurés à l'aide des algorithmes développés dans le cadre de la thèse. Au total, 1926 images SEM ont été prises dans 36 puces afin de cartographier uniformément l'OVL sur chacune des puces, sur chacun des champs et de façon très dense dans la partie logique. Quatre principales conclusions peuvent être tirées de cette expérience :

1. Un **biais entre la mesure optique et SEM** est observé selon l'axe Y. Ce *Non-Zero Offset* (NZO) est dépendant du motif mesuré et varie peu entre les mesures basées sur les algorithmes BRR et BCE. En particulier, le motif n°1 montre un biais de -1.93 nm lorsque mesuré par BCE et -1.84 nm lorsque mesuré par l'algorithme BRR.
2. Les motifs 1 et 2 présentent tout deux un **NRE vis-à-vis de la mesure optique d'environ 3 nm**. Cette valeur correspond à la variabilité de l'*On-Product Overlay* (OPO) à 3σ autour de la valeur prédite par la mesure optique. La variabilité au sein d'un bloc logique, d'aire 1 mm^2 , peut quant à elle être estimée à 2.83 nm à 3σ selon les mesures du motifs n°3.
3. La mesure **BRR corrèle parfaitement avec la mesure BCE** sur le motif n°1. La prise en compte des motifs partiellement masqués améliore en effet la corrélation avec la mesure optique pour les deux motifs. Sur le motif n°2, la faible quantité de bord verticaux laisse cependant une variabilité significative.
4. Des **tendances intra-puce ont été démontrées**. Une signature de grandissement associée à un cisaillement est particulièrement visible sur le motif n°2. L'amplitude de cette signature de (2.75 nm, 2.62 nm) à 3σ est cependant faible vis-à-vis du résiduel intra-champ d'une amplitude de (4.24 nm, 3.10 nm).

La prochaine Section proposera deux approches d'utilisation de la mesure overlay SEM en ligne de production. La première approche est basée sur le développement d'un modèle hybride combinant les données SEM et optiques. La seconde, consiste à greffer la mesure BCE sur la mesure en ligne du CD dans pour certains niveaux, afin de réaliser un suivi de la tendance et de détecter les anomalies.

4.2 Utilisation industrielle des mesures SEM OVL

Une fois la mesure SEM de l'overlay possible sur des mires ou dans le produit, il faut être capable d'utiliser cette nouvelle donnée au sein de la production. Dans cette Section, nous proposons deux approches distinctes et complémentaires d'utilisation des mesures SEM OVL. Premièrement, nous étudierons l'intérêt de générer un modèle hybride combinant des mesures optiques et SEM de la section précédente dans le but de réduire le résiduel sur l'On-Product Overlay (OPO). Dans la deuxième partie nous verrons un cas d'implémentation en ligne de la mesure SEM OVL basée sur le Barycentre du Contour Extrait (BCE) et nous verrons comment ces mesures peuvent être utilisées.

4.2.1 Modélisation hybride SEM - Optique

Modèles intra-champ par jeu de mesure

Les données overlay sont généralement analysées sous forme de modèles à partir desquels le scanner peut effectuer une correction. Nous utiliserons ici les données mesurées dans la Section 4.1, et plus particulièrement les mesures BCE sur les motifs 1 et 2. Le motif n°3 n'a pas vocation à servir pour modéliser de l'overlay intra-champ car sa disposition dans le champ n'est pas assez uniforme. L'analyse montre des résultats similaires sur l'ensemble des quatre champs, cependant pour simplifier l'analyse, seul le champ central (0, 0) sera considéré.

La Figure 4.11a présente l'overlay mesuré sur le champ (0, 0). Les signatures sont a priori similaires. Des modèles d'overlay iHOPC ont été ajustés sur les 3 sets de données indépendamment pour chaque champ comme pour une Correction Par Exposition (CPE). Les trois modèles ajustés sur ce champ sont présentés dans la Figure 4.11b sur une grille virtuelle où un vecteur est dessiné au centre de chaque puce.

Les coefficients des 3 modèles sont donnés Figure 4.12. Les coefficients des modèles obtenus à partir du SEM et de l'optique sont relativement similaires entre eux hormis pour 4 paramètres sur 15. Les différences peuvent être expliquées par les différentes cartographies des mesures. Enfin, les modèles SEM des motifs 1 et 2 diffèrent du modèle optique de respectivement 2.3 nm et 1.9 nm pour le terme de translation Y. Cela est cohérent avec le NZO mis en évidence dans la partie 4.1.3.

La Figure 4.13 montre, pour chacun des jeux de mesure, une cartographie et les densités de probabilités en X et en Y des résiduels sur le champ (0, 0), après avoir retiré le modèle intra-champ correspondant.

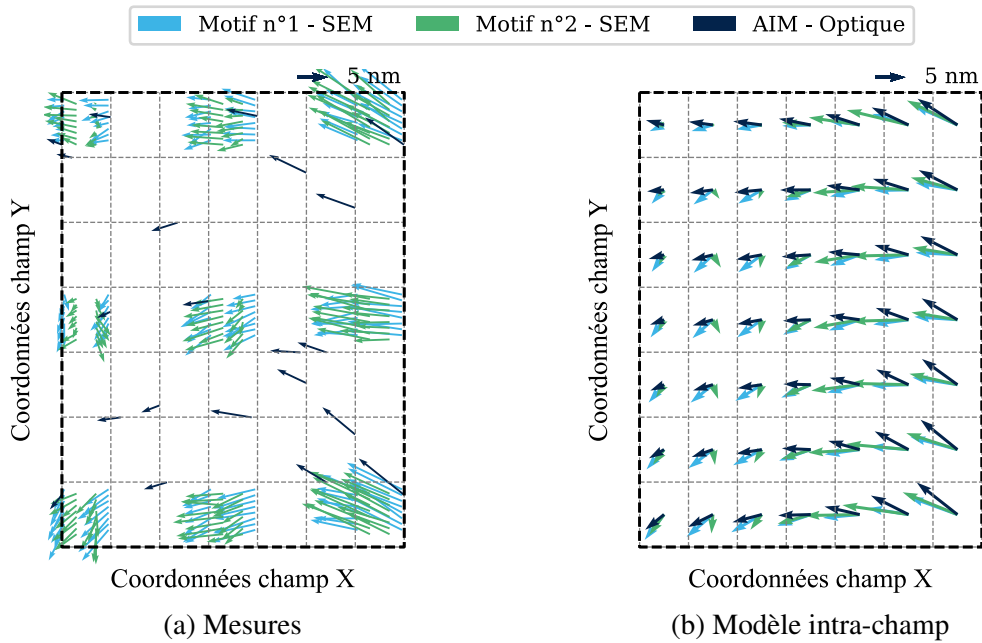


FIGURE 4.11 L'overlay sur le champ (0, 0) est modélisé avec un modèle iHOPC. Représentation vectorielle des mesures (a) et du modèle (b) avec un point artificiel au centre de chaque puce.

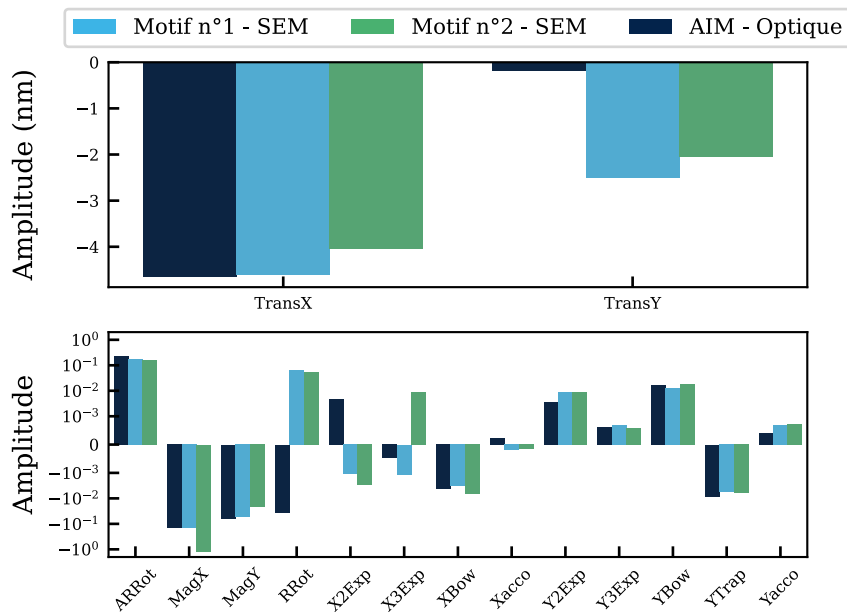


FIGURE 4.12 Amplitude des coefficients du modèle iHOPC sur les 3 sets de mesures : optique, SEM sur le motif n°1 et n°2.

Cette dernière représentation s'apparente à un histogramme des résiduels normalisé pour que l'aire totale sous chacune des courbes vaille 1. La densité de probabilité est estimée par

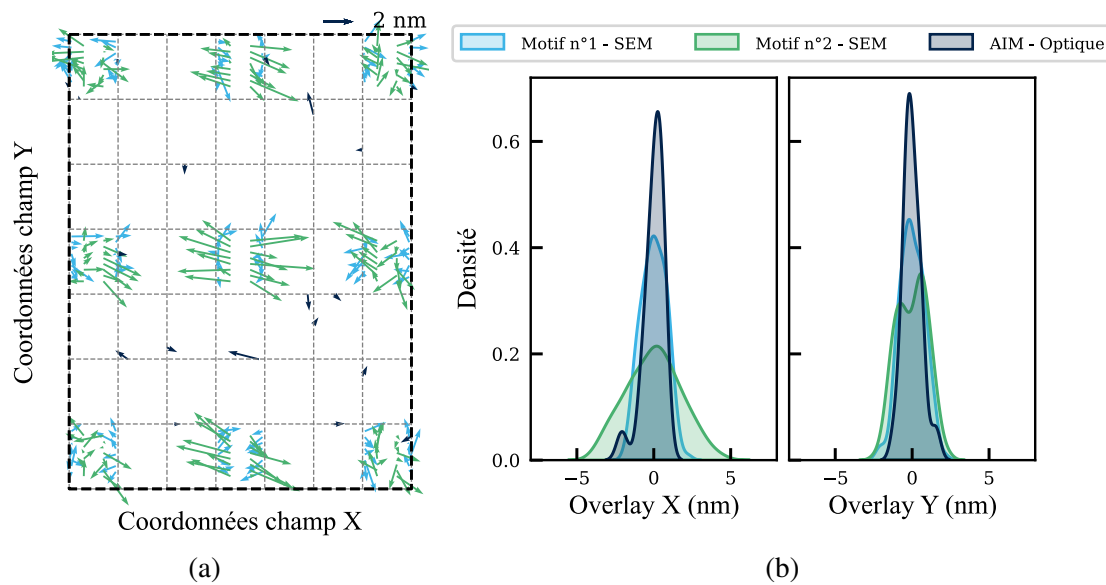


FIGURE 4.13 Résiduel sur le champ central (0, 0) après correction du modèle iHOPC ajusté pour chacun des 3 sets de mesure. (a) Cartographie des résiduels ; (b) Densité de probabilité des résiduels.

la méthode de Scott [126, 127]. Le résiduel sur le motif n°1 a une dispersion similaire à celui des mires optiques. Le motif n°2 montre quant à lui une amplitude plus élevée selon l'axe X. Les puces centrales du champ subissent un effet de grandissement positif non pris en compte dans le modèle iHOPC. Cet effet a déjà été observé dans la Section 4.1.5 lorsque ce même résiduel a été modélisé une seconde fois par un modèle linéaire.

Correction par un modèle SEM

Lors de la fabrication des puces, seules les mesures optiques sont communément utilisées. Comme expliqué Section 1.2.3 page 23, un modèle overlay est ajusté sur ces mesures, qui est renvoyé vers le scanner de lithographie. Ce modèle sert à corriger l'exposition des futures plaques pour minimiser le résiduel sur la mesure optique. Dans le cas où l'overlay est hors des spécifications sur la plaque mesurée, la plaque peut être nettoyée et l'étape de lithographie est répétée avec de nouveaux paramètres. Nous avons alors appliqué le modèle overlay optique aux mesures SEM des motifs n°1 et n°2 regroupés dans un seul jeu de données nommé "SEM". L'objectif est de simuler quelle serait l'amplitude du résiduel dans le produit, si cette plaque était ré-exposée avec une correction basée sur les mesures optiques. Dans un premier temps, la Figure 4.14 montre la distribution des jeux de mesure optique et SEM avant toute correction.

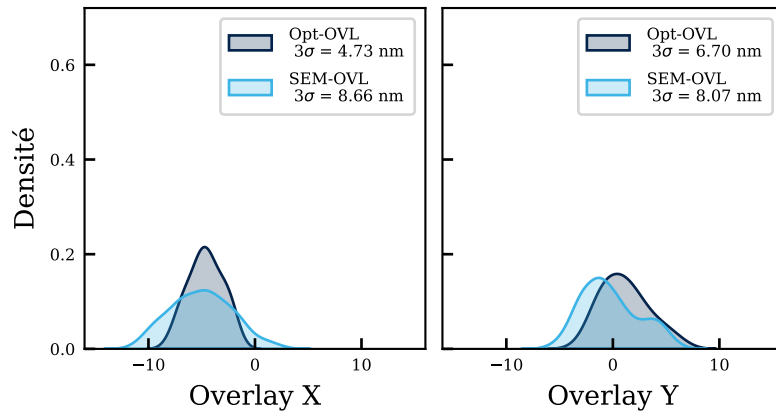


FIGURE 4.14 Densité de probabilité des mesures optiques (en bleu marine) et des mesures SEM (en bleu cyan) avant correction.

La Figure 4.15 montre les densités de probabilité des résiduels après correction optique. Le biais d'environ 2 nm selon l'axe Y est sans surprise retrouvé, et le 3σ de la mesure SEM atteint 5.51 nm contre 1.96 nm pour la mesure optique. Cette figure fait écho à la Figure 2 d'introduction : sur une plaque de production où l'overlay serait parfaitement en spécification, l'overlay sur le produit est possiblement décentré et montre une plus grande variabilité que l'overlay sur les mires optiques !

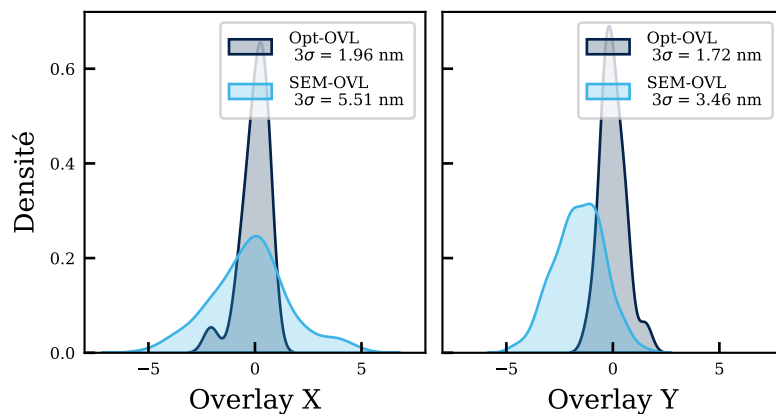


FIGURE 4.15 Densité de probabilité des résiduels des mesures optiques (en bleu marine) et des mesures SEM (en bleu cyan) après correction basée sur le modèle optique.

Il est alors intéressant de voir quel serait l'effet d'une correction basée sur les mesures SEM. La Figure 4.16 présente les distributions des résiduels dans ce cas. Le résiduel des mesures SEM est désormais centré en 0 et l'application du modèle SEM a permis de resserrer la distribution de l'OPO en X et en Y respectivement de 5.51 nm à 4.66 nm, et de 3.46 nm à

2.93 nm. Cependant l'écart-type du résiduel optique est moins réduit que lors d'une correction par un modèle optique.

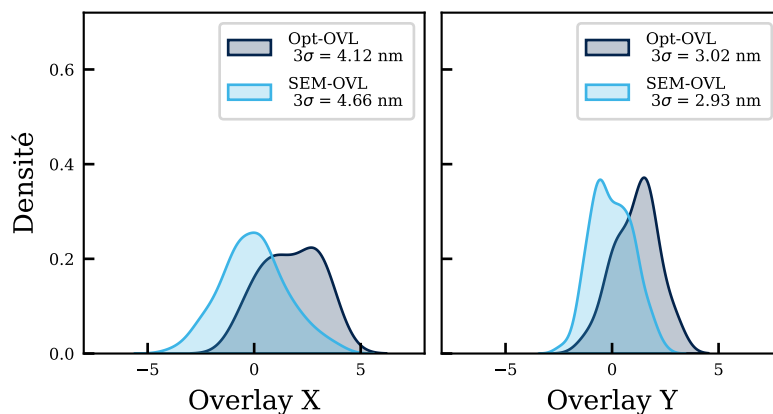


FIGURE 4.16 Densité de probabilité des résiduels des mesures optiques (en bleu marine) et des mesures SEM (en bleu cyan) après correction basée sur le modèle SEM.

Les graphes précédents sont résumés Figure 4.17. Les écarts-types des valeurs brutes et des résiduels obtenus pour chacun des set de données en fonction du modèle utilisé y sont détaillés. L'utilisation d'un modèle SEM améliore de respectivement 15% et 16% l'écart-type du résiduel sur le produit. Le résiduel sur les mesures optiques est lui aussi amélioré par cette correction SEM, en particulier le long de l'axe Y. En revanche ce résiduel est bien plus élevé que lors de la correction optique, en particulier selon l'axe X.

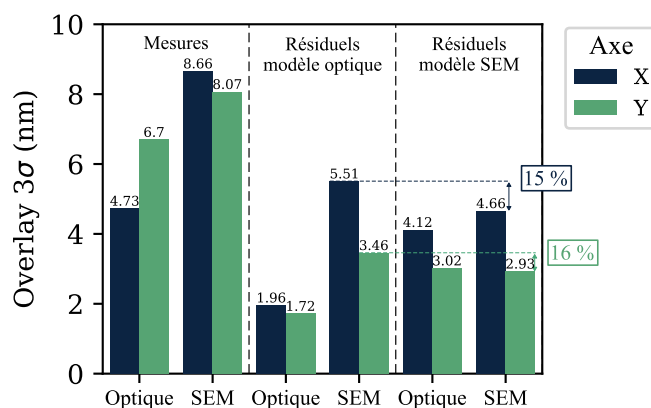


FIGURE 4.17 Résumé de l'ensemble des écart-types obtenus sur les résiduels optique et SEM selon le modèle appliqué pour la correction. Le graphique s'interprète ainsi : les deux barres de la quatrième colonne indiquent que lorsqu'un modèle optique est appliqué aux sets de mesures SEM, le résiduel a une variabilité à 3σ de 5.51 nm en X et 3.46 nm en Y.

Modèle hybride

Pour limiter cette dégradation du résiduel optique suite à la correction par un modèle basé uniquement sur les mesures SEM, nous proposons de réaliser un modèle hybride comprenant les deux informations. Trois modèles hybrides sont envisagés :

1. Concaténation directe des trois jeux de données : il y aura 288 mesures SEM (93 %) contre 21 mesures optiques (7 %) dans le jeu hybride ;
2. Les mesures SEM sont moyennées par puce avant la concaténation : il y aura 18 mesures SEM (42 %) contre 21 mesures optiques (58 %) dans le jeu hybride ;
3. Les mesures SEM sont sélectionnées manuellement de façon à homogénéiser la répartition spatiale des mesures. Un site est sélectionné par motif et par puce : il y aura 18 mesures SEM (42 %) contre 21 mesures optiques (58 %) dans le jeu hybride.

Le jeu de données hybride n°1 correspond aux mesures Figure 4.11a tandis que les jeux hybrides n°2 et n°3 sont représentés Figure 4.18.

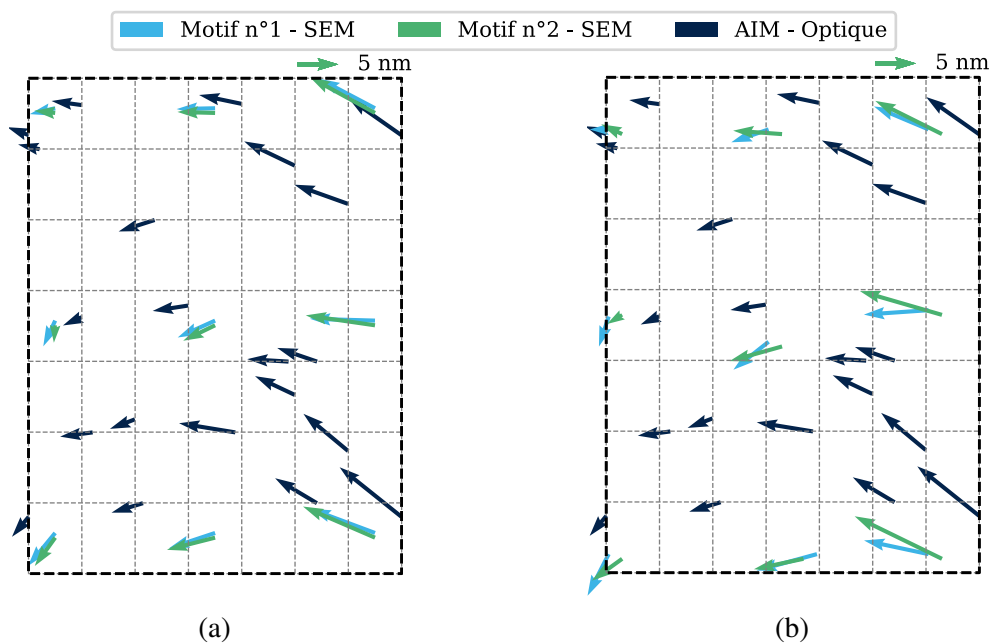


FIGURE 4.18 Jeux de mesures utilisés pour la génération des modèles hybrides pour le champ (0, 0). (a) Les mesures SEM sont moyennées par puce. (b) Une mesure SEM est sélectionnée par puce afin d'homogénéiser la répartition spatiale des mesures.

La Figure 4.19 résume l'ensemble des écart-types obtenus sur les résiduels optique et SEM selon le modèle appliqué pour la correction. L'ensemble des distributions est disponible Annexe D.

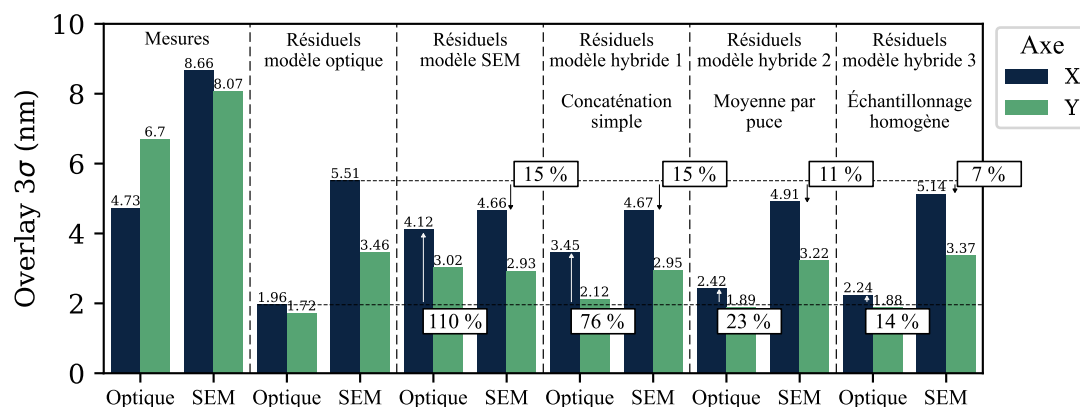


FIGURE 4.19 Résumé de l'ensemble des écart-types obtenus sur les résiduels optique et SEM selon le modèle appliqué pour la correction. Les six premières colonnes correspondent à la Figure 4.17. L'ensemble des distributions est disponible Annexe B.

Pour analyser ce graphique il faut se rappeler l'objectif : nous cherchons un modèle hybride qui permet de réduire la variation de l'overlay sur le produit (NZO), mesuré à l'aide du SEM, tout en minimisant la détérioration de la correction de l'overlay optique. Autrement dit, sur la Figure 4.19 il s'agit de réduire les barres "SEM" tout en évitant d'agrandir celles des colonnes "Optique". Nous nous concentrons sur l'analyse de l'overlay X et prenons comme référence la correction par le modèle optique.

Le modèle hybride n°1 présente un cas très favorable à l'overlay SEM et est peu réaliste, les écart-types sont en effet très proches des valeurs d'une correction basée seulement sur un modèle SEM. En outre, un léger gain est obtenu sur les données optiques : l'ajout des 21 points optiques a permis de réduire à 76% la dégradation du résiduel en X contre 110% sans correction. Les modèles 2 et 3 correspondent à des propositions plus réalistes, avec une proportion de mesures SEM et optique équilibrée. Le modèle n°2 présente un très bon compromis : l'intégration de plusieurs mesures permet de lisser les variabilités locales de l'overlay pour la génération du modèle. Cette solution nécessite cependant un nombre conséquent de mesures. D'une manière générale, nous démontrons qu'il est possible de réduire l'OPO à l'aide d'un modèle hybride. L'application d'un tel modèle sur une Correction Par Exposition permettrait d'atteindre des spécifications à ± 3 nm à 3σ sur la mesure optique et de maintenir l'overlay sur le produit (OPO) inférieur à 5 nm. Il est important de se rappeler que cette étude n'a été effectuée que sur un champ d'une plaque. Avant toute application industrielle il serait nécessaire de regarder l'effet sur toute une plaque et la consistance d'une telle correction d'un lot à l'autre sur la ligne de production.

4.2.2 Implémentation de la mesure OVL sur la ligne de production

Plan d'expérience

Une autre application de la mesure SEM en production consiste à réaliser un suivi en ligne. Pour cela, la mesure de l'overlay basée sur le Barycentre du Contour Extrait (BCE) a été implémentée au sein d'ImageLab. Cette infrastructure, décrite Section 2.3.2 page 70, permet d'ajouter des mesures basées sur l'extraction de contours en plus des mesures SEM de la ligne de production. Pour cela, nous avons codé une sur-couche en Java pour implémenter la méthode BCE dans SIMPL, la mesure n'étant pas nativement disponible dans le logiciel.

La mesure est effectuée sur un des produits de la technologie 18 nm en développement chez STMicroelectronics. Le niveau VIA0, le premier niveau d'interconnexions après le niveau Contact, est réalisé par *double-patterning* (cf. Section 1.1.3). Deux étapes de lithographie sont alors nécessaires pour transférer le motif : VI01 et VI02. Ces deux niveaux sont tous deux alignés aux niveaux Contact 1 et Contact 2, eux aussi réalisés en *double-patterning* et alignés sur le niveau Grille. La mesure SEM présente deux intérêts principaux pour ce niveau :

1. Le niveau étant réalisé par deux lithographies de division de *pitch*, la mesure SEM-OVL BCE est parfaitement adaptée car les deux niveaux sont entièrement visibles ;
2. Les niveaux VI01 et VI02 ne disposent actuellement pas de mires optique de mesure de l'overlay en ligne. L'ajout d'une mesure SEM permet de suivre cet overlay sans rajouter de mires supplémentaires dans les lignes de découpe.

Nous mesurons l'overlay sur la mire dédiée à la mesure CD illustrée Figure 4.20a. La division du *pitch* est très claire ici : les rangées de VIA sont définies alternativement par les deux lithographies. Pour pouvoir identifier la lithographie correspondante nous nous plaçons en bord de motif. Ainsi, l'algorithme d'extraction s'aligne sur l'ensemble des VIA et sait que la première rangée correspond à la lithographie VI01. Ensuite, l'overlay est calculé selon l'algorithme BCE, en réalisant la différence entre les barycentres des VIAs pour chacune des lithographie. Comme illustré Figure 4.20b la recette de production a été modifiée : la prise d'image en milieu de mire est conservée pour la mesure CD tandis qu'une seconde prise d'image SEM est effectuée sur le bord avec un grossissement plus faible afin d'observer plus de VIAs. L'échantillonnage CD est conservé : 1 point est mesuré par champ, sur les 17 champs habituellement sélectionnés.

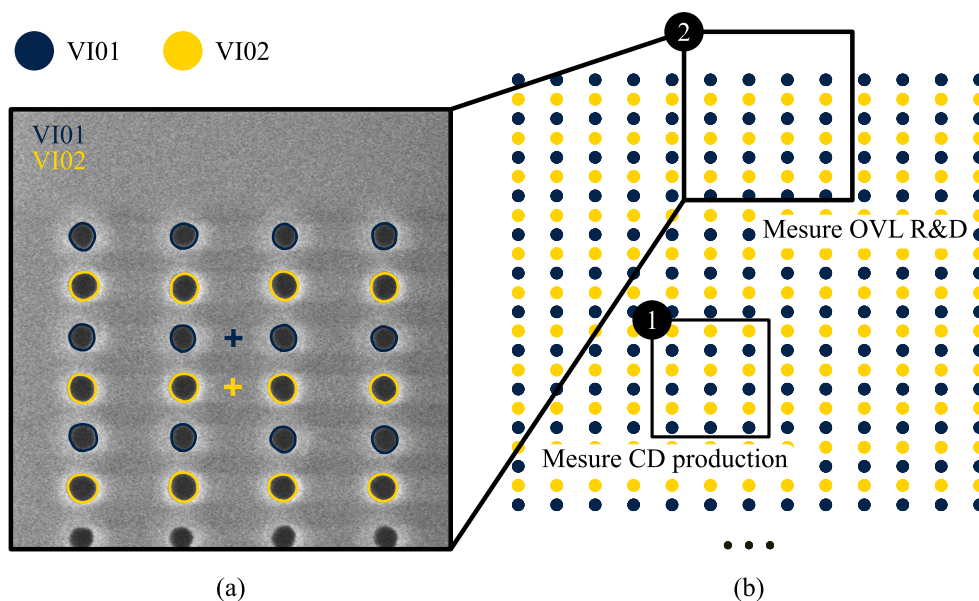


FIGURE 4.20 (a) Motif en *double-patterning* mesuré à l'aide de BCE. (b) Ce motif correspond au bord supérieur de la mire de mesure du CD. La prise d'image SEM pour la mesure OVL est ajoutée à celle de la mesure CD.

Résultats et interprétations

La mesure a été mise en écoute sur un produit entre décembre 2022 et mars 2023. Sur cette durée, 10 lots ont été mesurés pour un total de 36 plaques et 612 mesures.

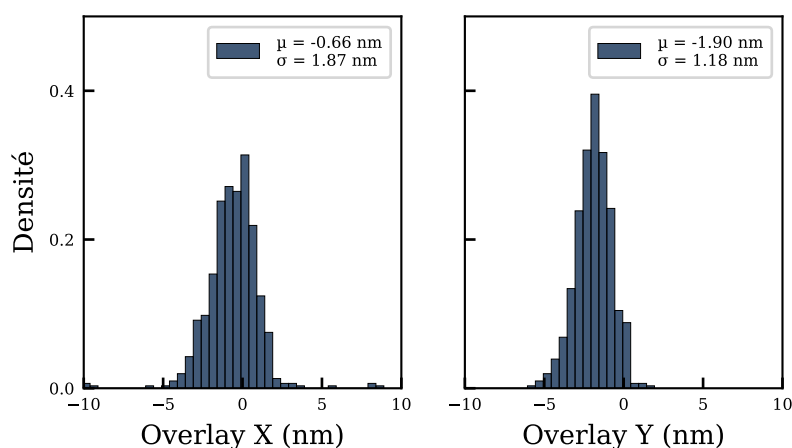


FIGURE 4.21 Histogramme des mesures OVL VI01-VI02 sur une période de 3 mois. La valeur moyenne (μ) et l'écart-type (σ) des distributions sont indiqués en légende.

La Figure 4.21 montre les distributions des mesures OVL selon les axes X et Y. La spécification $USL_{x,y}$, telle que définie Equation 1.5 page 24, sur ces niveaux est de 5 nm sur

les mirens optiques. Avec une moyenne de -1.90 nm et un écart-type de 1.18 nm, la mesure serait hors des spécifications optiques : $|\overline{OVL}_y| + 3\sigma(OVL_y) = 5.5 \text{ nm} \geq USL_y$. On observe de plus un NZO de -0.66 nm et -1.90 nm en X et en Y. Un re-centrage de la lithographie sur les mesures SEM permettrait d'améliorer le rendement et de relâcher des contraintes sur l'overlay optique.

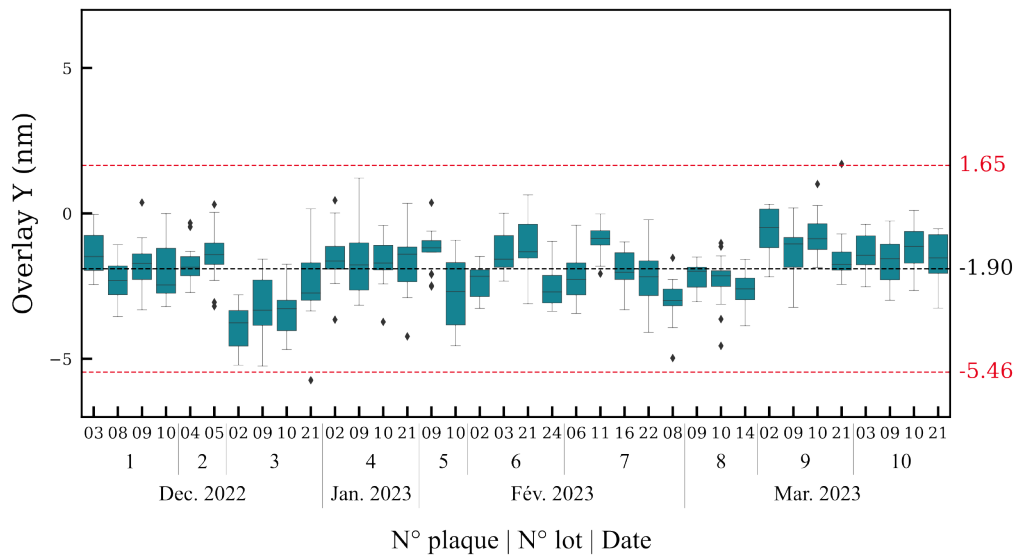


FIGURE 4.22 Évolution des mesures de l'overlay VI01 sur VI02 sur le produit. Chaque boîte correspond à une plaque d'un lot, et indique la valeur moyenne et écart-type des 17 mesures effectuées sur la plaque.

La Figure 4.22 représente l'ensemble des mesures effectuées selon l'axe Y sous forme d'un diagramme en boîte. Chaque boîte correspond à une plaque d'un lot, et donc à 17 mesures. Au cours du développement du procédé, les recettes ont pu être changées sur certains lots dans le cadre d'expérience pour améliorer le procédé. Le suivi dans le temps de la métrique d'overlay SEM nous permet d'identifier les variations de procédé qui donnent lieu à une dégradation de l'overlay telles que le lot n°3 ou la plaque 10 du lot n°5. L'ensemble des boîtes étant situées dans la partie négative. La moyenne des écart-types par plaque est de 1.40 nm, ce qui est légèrement supérieur à l'écart-type de 1.18 nm sur l'ensemble des mesures : la variabilité sur trois mois de production est d'amplitude inférieure à celle sur une plaque !

L'essentiel

Dans cette partie nous avons proposé deux applications industrielles de la mesure de l'overlay SEM.

La première consiste à la réalisation d'un **modèle hybride** comprenant des mesures optiques complétées par des mesures SEM afin de réduire la dispersion de l'overlay au sein du produit (OPO). Trois jeux de données hybrides ont été proposés et analysés. Nous démontrons qu'avec une telle approche il est possible de réduire l'OPO à une amplitude inférieure à 5 nm à 3σ .

La seconde consiste à **implémenter la mesure SEM en ligne**, en la greffant aux mesures CD afin de ne rajouter qu'un temps de mesure faible. Ainsi, un suivi de l'overlay peut être réalisé et permet de détecter les déviations du procédé ainsi que de contrôler le NZO.

La prochaine section sera dédiée à la mesure OVL entre le niveau Contact et Grille à l'aide de plusieurs équipements optique et d'un équipement SEM à haute tension dédié à la mesure OVL.

4.3 Mesure haute tension dans la SRAM

Dans l'état de l'art présenté Section 1.3 page 29, la mesure de l'overlay par SEM est effectuée à l'aide de hautes tensions afin de pouvoir observer le niveau inférieur même quand celui-ci est enterré. Dans cette partie, nous profiterons d'une excursion au sein de la production de STMicroelectronics afin d'utiliser, dans le cadre d'une démonstration, les capacités de haute tension de SEM dédiés à la mesure overlay.

4.3.1 Contexte

Dans l'industrie micro-électronique, on parle d'excursion lorsque plusieurs plaques présentent une perte significative de rendement. Ce rendement est défini comme le pourcentage de puces électriquement fonctionnelles. Cette mesure est effectuée au terme de la fabrication, avant la mise en boîtier, au cours d'une étape appelée *Electrical Wafer Sort* (EWS).

Récemment, une série de plaques a montré une perte de rendement significative ainsi qu'une signature overlay Contact sur Grille dite en "vortex" visible Figure 4.23. Comme le montre la Figure 4.24, le croisement entre les tests EWS et les mesures OVL optiques montre plusieurs désaccords intrigants. Sur plusieurs puces, l'overlay est dans les spécifications alors que le test EWS montre une puce non fonctionnelle (Jaune), et inversement (Gris)!

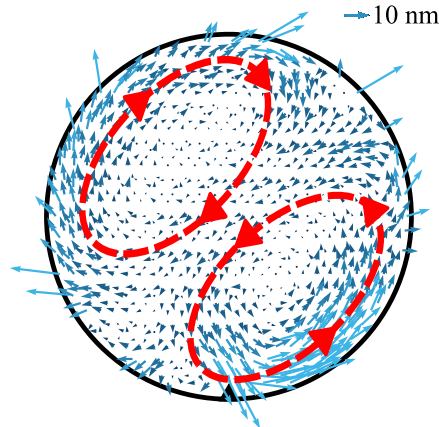


FIGURE 4.23 Signature “vortex” de l’overlay sur les plaques présentant un faible rendement.

Pour comprendre ce mismatch, quelques sites sont observés au microscope électronique à transmission (TEM). Cette opération nécessite une préparation longue et destructrice de la plaque de silicium. L’overlay dans la SRAM est alors mesuré localement à l’aide d’images similaires à celle de la Figure 4.24c. Cette procédure est très lente (plusieurs semaines), destructrice, couteuse et ne permet de mesurer qu’une dizaine de points par plaque, alors qu’une mesure en ligne de l’overlay en comprend plusieurs centaines ! À ce jour, la mesure TEM est cependant l’unique solution disponible à STMicroelectronics pour mesurer l’overlay au sein de la puce, en particulier dans la SRAM où les motifs sont les plus denses.

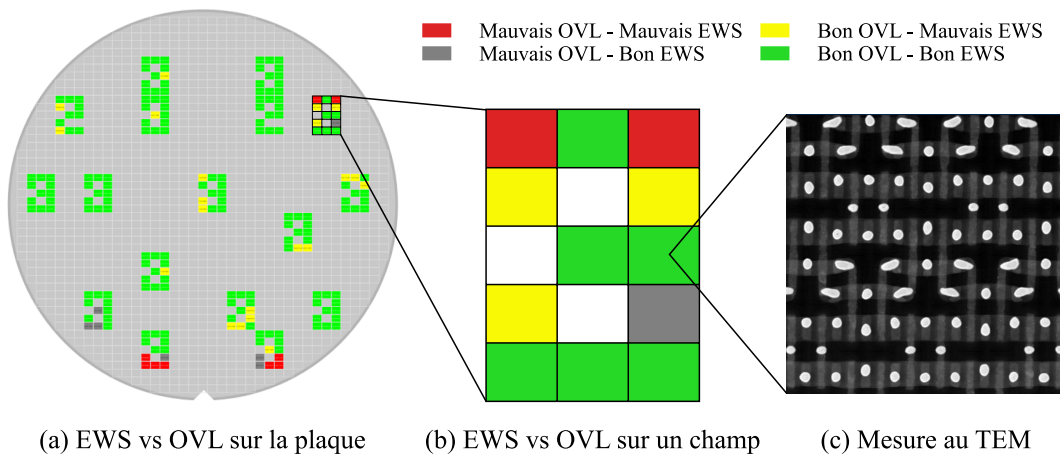


FIGURE 4.24 L’analyse de l’excursion a montré des désaccords entre les spécifications overlay et les tests EWS représentés (a) et (b). Pour vérifier les causes de défaillances, des mesures au TEM sont effectuées (c).

Cette excursion est donc une très bonne opportunité d’évaluer l’apport de la métrologie SEM OVL pour STMicroelectronics. Étant une priorité de la production, nous avons eu

accès à plus de moyens. En particulier, dans le cadre d'une démonstration avec Applied Materials nous avons pu effectuer des mesures sur le PROVision 4E, un équipement dédié à la métrologie overlay par SEM. L'objectif de cette étude est double : (1) fournir aux ingénieurs d'intégration une information sur l'amplitude de l'overlay Contact sur Grille dans la SRAM pour les assister dans la prise de décision du futur de ces plaques et (2) évaluer la représentativité vis-à-vis de la mesure SEM des différentes mires d'overlay optique disponibles.

4.3.2 Plan d'expérience

Trois mires optiques présentées en détail Section 1.3 page 29 sont étudiées : la mire AIM, μ DBO et AIMiD. Ces trois mires sont représentées à la même échelle Figure 4.25. Les trois mires et leurs mesures associées ont été qualifiées au préalable sur ce niveau par l'équipe de métrologie. La mire AIM est couramment utilisée en production sur ce produit tandis que la mire AIMiD est une mire similaire de dimension réduite avec un côté de $6\ \mu\text{m}$ contre $30\ \mu\text{m}$. Ces deux mires fonctionnent sur le principe de l'IBO, c'est-à-dire sur l'analyse d'une image provenant d'un microscope optique. La troisième mire, la μ DBO, est basée sur l'analyse d'un signal diffracté. Celle-ci est de taille intermédiaire avec un côté de $16\ \mu\text{m}$.

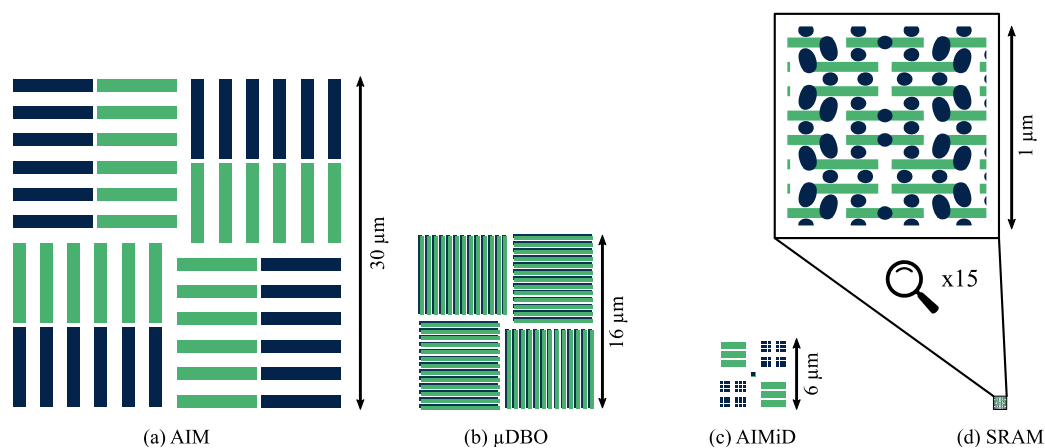


FIGURE 4.25 Schémas des mires optiques et de la cellule SRAM à la même échelle.

Pour comparer ces différentes mires, la mesure SEM est utilisée comme référence. La Figure 4.26 représente l'échantillonnage de mesure au sein d'un champ : 12 mesures seront effectuées sur les mires AIM et AIMiD, 9 sur les mires μ DBO et 15 dans la SRAM à l'aide du SEM.

La mesure SEM, détaillée Figure 4.27, est effectuée directement dans la SRAM à l'aide d'une méthode similaire à BCE. L'utilisation de hautes tensions permet d'observer les deux niveaux. L'image Figure 4.27a obtenue par les capteurs à électrons secondaires est utilisée pour l'extraction de contour du haut des contacts tandis que l'image Figure 4.27b provenant des capteurs à électrons-rétrodiffusés (BSE, définis page 50) permet la segmentation des grilles. La différence entre les barycentres selon l'axe X donne alors la valeur d'overlay. L'équipementier évalue l'incertitude de sa mesure à partir de la répétabilité : la mesure est répétée 10 fois sur 20 sites, en variant la rotation de la plaque de 180°. Une incertitude de 0.2 nm est alors obtenue sur la mesure SEM, contre 0.5 nm pour la mesure sur la mire μ DBO. Comme lors de nos précédents travaux Chapitre 3 Section 3.3 seule la mesure selon un axe est fiable sur la SRAM. La prise d'image est effectuée avec une énergie d'accélération de 38 keV, un FoV de 1.11 μ m, et une taille de pixel de 1 nm. Ces 1519 images ont été prises en 1 heures et 35 minutes (3.8 secondes par image). A titre de comparaison, avec les SEM à disposition dans l'équipe métrologie et avec la configuration utilisée Section 4.1 cela aurait pris 4 heures et 19 minutes (10.3 secondes par image).

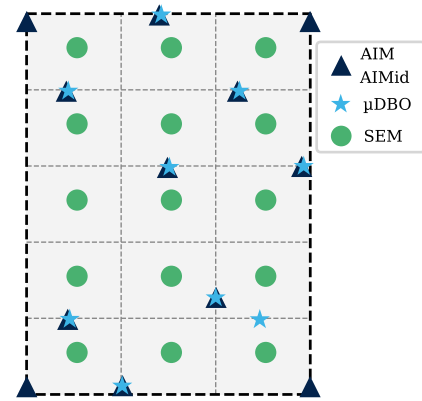


FIGURE 4.26 Cartographie des mesures OVL.

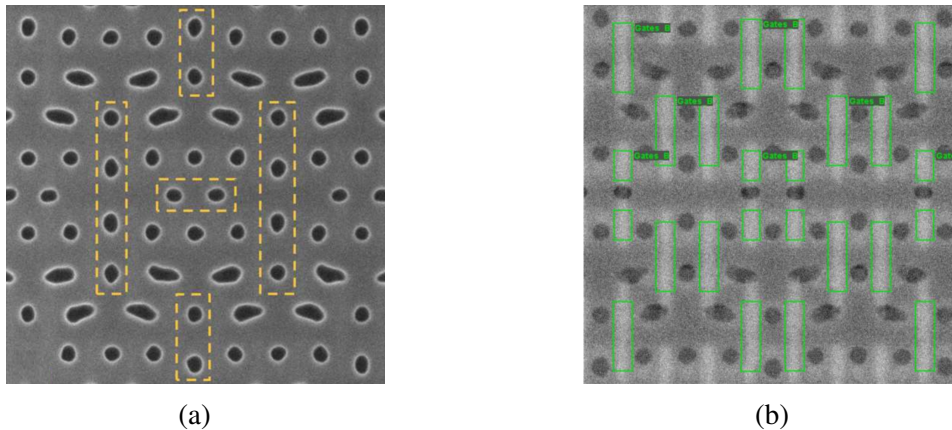


FIGURE 4.27 Images SEM hautes tensions utilisées pour la mesure de l'overlay sur le PROvision. L'image (a) correspond à l'image renvoyée par le capteur à électrons secondaires (SE) et est utilisée pour avoir une extraction de contour haute définition du haut des contacts. L'image (b) est obtenue simultanément par les capteurs à électrons rétro-diffusés (BSE) et est utilisée pour la segmentation des contours des grilles. L'overlay est ensuite obtenu par la différence des barycentres, similairement à la méthode BCE.

Plusieurs plaques présentant cette signature overlay ont été arrêtées après gravure Contact, et ont été mises de côté. L'une d'elle a été mesurée optiquement sur les trois mires, sur tous les champs disponibles pour un total de 1198, 1197 et 925 points de mesure (AIM, AIMiD, et μ DBO). Nous avons ensuite envoyé cette plaque dans les locaux d'Applied Materials pour y effectuer les 1519 points de mesures SEM.

4.3.3 Résultats des mesures

Les mesures optiques sur cette plaque sont représentées Figure 4.28. La signature en double vortex est visible sur les trois cartographies, et de manière particulièrement claire sur les mesures μ DBO. L'amplitude et l'orientation des mesures sont similaires. La mesure AIMiD présente une signature moins nette, avec une mesure qui semble a priori plus bruitée. La mire AIMiD est en effet bien plus petite que la mire AIM avec la même technologie de mesure. Pour supprimer les quelques points aberrants provenant d'une erreur métrologique, un filtre à 5σ a été appliqué. Au total 5, 1, 5 et 1 sites de mesures ont été retirés respectivement sur les jeux de données AIM, AIMiD, μ DBO et SEM.

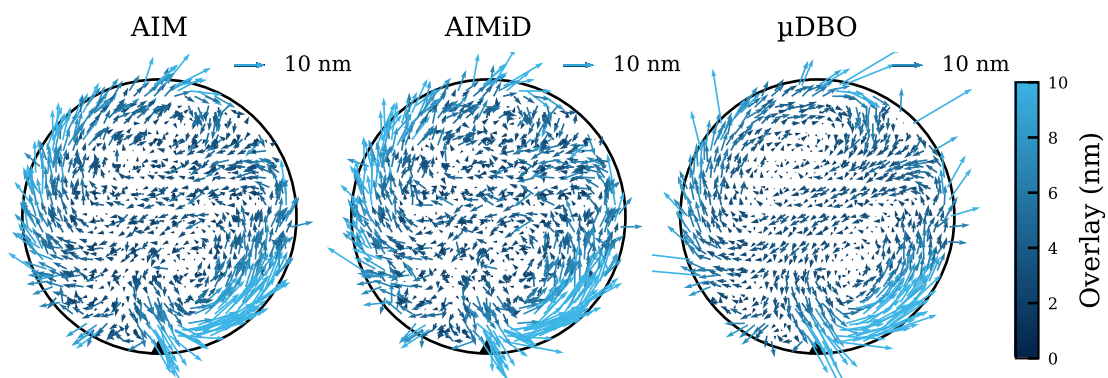


FIGURE 4.28 Cartographie mesure OVL optique sur les mires AIM, AIMiD et μ DBO

Cette étude se concentrera uniquement sur les mesures selon l'axe X. La Figure 4.29 cartographie la projection X des mesures overlay pour chacune des quatre méthodes de mesure utilisées. Les signatures sont très similaires et montrent une amplitude de l'ordre de ± 20 nm. Les quelques points bleus en bas de plaque sur la mesure SEM correspondent à une erreur de mesure : la topologie de l'encoche en bas de plaque semble avoir provoqué un mauvais focus. Ces points ne seront pas pris en compte dans l'analyse.

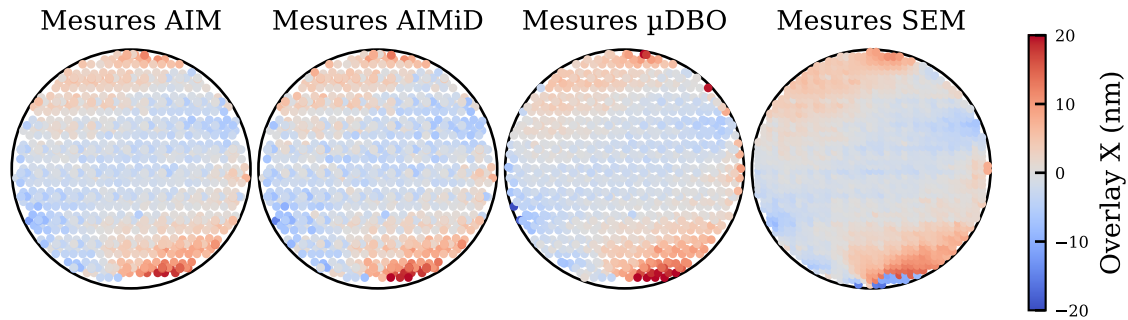


FIGURE 4.29 Cartographie des mesures overlay selon X sur les trois mires optiques (AIM, AIMiD, μ DBO) et par SEM dans la SRAM.

4.3.4 Analyse de la représentativité des mires optiques

Dans cette partie la mesure SEM est utilisée comme mesure de référence de l'overlay sur le produit, et donc la mesure optique doit s'en approcher au maximum.

Comparaison directe à la mesure SEM

Dans un premier temps, les mesures optiques sont comparées à l'overlay mesuré sur le produit par le SEM. La Figure 4.30 présente pour chaque mire optique la différence entre la mesure SEM de l'OPO avec la mesure optique la plus proche.

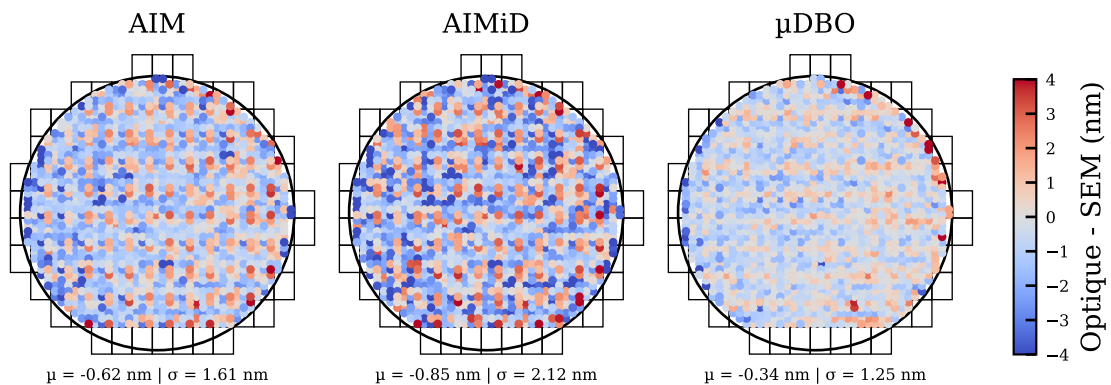


FIGURE 4.30 Différence entre la mesure SEM OPO et la mesure optique la plus proche selon la mire utilisée. En dessous de chaque cartographie, la valeur moyenne (μ) et l'écart-type (σ) des écarts à la mesure SEM sont notés.

Une distance moyenne de 3.8 mm sépare les mires optiques des mesures SEM dans la SRAM. La mire AIMiD présente le NZO le plus élevé avec une moyenne de -0.85 nm, contre -0.62 nm et -0.34 nm pour les mires AIM et μ DBO. En terme de dispersion, les mires AIM

et μ DBO montrent les meilleures performances avec respectivement 1.61 nm et 1.25 nm. De manière générale, la mire μ DBO semble présenter des mesures plus représentatives de l'overlay sur le produit (OPO).

Pour aller plus loin dans l'analyse, la Figure 4.31 présente les corrélations entre la mesure SEM sur la SRAM et la valeur d'overlay X prédite par le modèle optique linéaire (cf. Section 3.3.2 page 95) ajusté sur les mesures AIM, AIMiD et μ DBO.

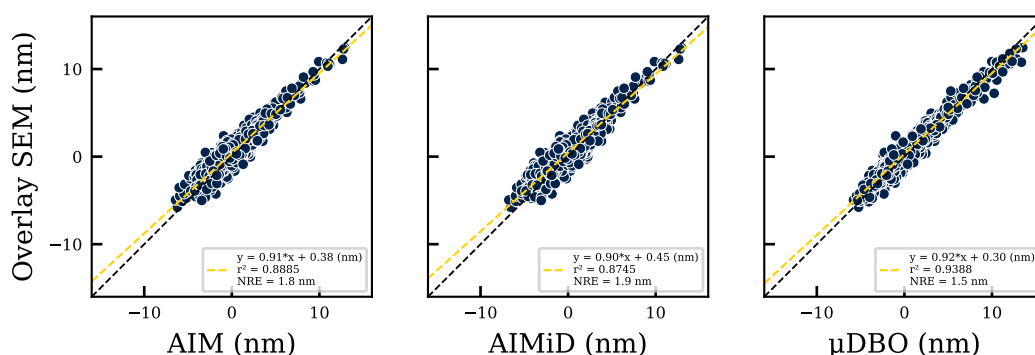


FIGURE 4.31 Corrélation de l'overlay mesuré au SEM dans la SRAM avec la valeur prédite par le modèle optique linéaire ajusté sur les mesures AIM, AIMiD ou μ DBO.

Les trois corrélations présentent de bonnes métriques vis-à-vis de nos précédentes études avec une pente autour de 0.91 et un biais compris entre 0.30 nm pour la mire μ DBO et 0.45 nm pour la mire AIMiD. La mesure IBO présente deux résultats très similaires sur la mire AIM et sur la mire AIMiD, avec un NRE de respectivement 1.8 nm et 1.9 nm. La mire μ DBO démontre des performances légèrement meilleures : son NRE est plus faible à 1.5 nm ce qui montre une meilleure représentativité de l'OPO.

Comparaison du résiduel sur le produit après correction

Comme dans la Section 4.2.1, nous regardons dans cette partie la variation de l'amplitude du résiduel des mesures SEM (OPO) en fonction de la mire utilisée pour la génération du modèle de correction. Plus précisément, un modèle linéaire par champ est ajusté sur chacun des jeux de mesure. Ces modèles sont ensuite appliqués aux mesures SEM afin d'évaluer quel serait le résiduel sur l'OPO d'une telle correction.

La Figure 4.32 cartographie le résiduel sur OPO pour une correction avec un modèle linéaire CPE basé sur les mesures AIM, AIMiD, μ DBO et SEM. Les densités de probabilités de chacun des résiduels sont représentés Figure 4.33a tandis que les moyennes et écart-types des distributions sont résumées Figure 4.33b. L'ensemble des cartographies et des

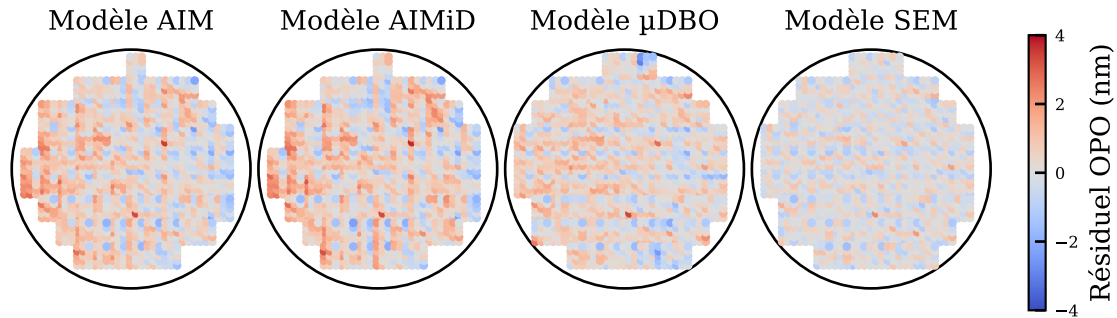


FIGURE 4.32 Résiduel sur la mesure SEM sur le produit (OPO) selon le modèle utilisé pour la correction. Les distributions correspondantes sont représentées Figure 4.33

histogrammes des résiduels après corrections pour chacun des quatre jeux de données est donné Annexe D.

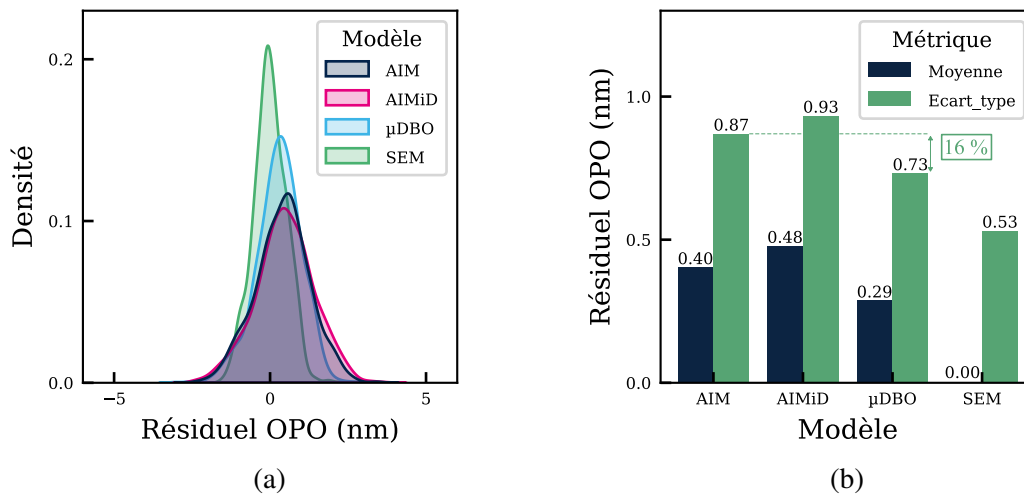


FIGURE 4.33 Distribution des résiduels sur les données SEM après modélisation linéaire CPE sur les différentes mires. (a) Densité de probabilité et (b) résumé des valeurs moyennes et des écart-types sur le résiduel OPO selon le modèle utilisé

Les mesures AIM et AIMiD montrent une correction similaire, avec les résiduels les plus élevés d'amplitudes 0.87 nm et 0.93 nm. De manière cohérente avec les précédents résultats, la mire μ DBO présente une amplitude du résiduel 16% plus faible et un biais de 0.29 nm contre 0.40 nm par rapport à la correction basée sur la mire AIM. La correction à partir du modèle SEM correspond au cas idéal, et montre la borne inférieure d'un écart-type de 0.53 nm.

Pour conclure, nous démontrons que la correction du NZO permise par l'utilisation de mesure SEM-OVL permettrait un gain de 0.40 nm sur l'overlay dans la SRAM par rapport à

la correction actuelle. De même, avec un modèle SEM, un écart-type de 0.53 nm sur l'OPO pourrait être obtenu, soit un gain de 0.34 nm par rapport à la correction AIM. De plus, la mesure SEM permet d'évaluer la représentativité des différentes mires optiques vis-à-vis de l'overlay sur le produit. En particulier, sur ce cas précis l'utilisation d'une mire μ DBO plutôt qu'une mire AIM permet une réduction de l'OPO : pour une même spécification overlay, on peut imaginer obtenir un meilleur rendement. En effet un gain de 16% sur l'écart-type de l'overlay sur le produit a été obtenu. L'écart-type étant non-linéaire, cela donne plutôt une réduction de la variance sur le produit de $\frac{0.87^2 - 0.73^2}{0.87^2} = 30\%$. Enfin, la mire AIMiD présente ici des performances faibles vis-à-vis des deux autres mires. Selon d'autres qualifications effectuées à STMicroelectronics sur divers produits, nous avons démontré que de meilleures performances pourraient être obtenues en changeant la géométrie.

L'essentiel

Dans cette Section nous avons évalué la représentativité de trois mesures optiques vis-à-vis de l'overlay sur le produit (OPO). Deux des mires sont basées sur l'analyse d'une image au microscope optique (AIM et AIMiD) tandis que la dernière consiste à l'analyse d'un signal diffracté (μ DBO). Pour comparer ces mesures, l'OPO a été mesuré directement sur la SRAM selon l'axe X à l'aide d'un SEM à hautes tensions dans le cadre d'une démonstration avec un équipementier. Cinq résultats principaux sont à noter :

1. Les trois mires montrent une **signature de vortex** aussi perçue par la mesure SEM et donc bien **présente sur le produit** ;
2. La mire **AIMiD**, telle qu'elle est conçue sur ce produit, présente une **représentativité de l'OPO inférieure** à celle de l'AIM et de la μ DBO ;
3. Sur les mesures brutes, sans modélisation, **la mire μ DBO donne la mesure la plus proche de l'OPO** avec un écart-type de l'erreur inférieur de 22% (1.25 nm contre 1.61 nm) ;
4. Une correction du NZO sur les valeurs brutes à l'aide de la mesure SEM permettrait un gain sur l'OPO de 0.62 nm sur une mesure AIM ;
5. L'utilisation d'un **modèle linéaire par champ réduit cet écart** entre les performances de la mire AIM vis-à-vis de la mire μ DBO. En particulier, le gain sur l'OPO à 3σ est réduit à 0.42 nm (16%).

4.4 Conclusions

Ce dernier chapitre a été l'occasion d'amorcer l'application industrielle de la mesure SEM-OVL au sein de la ligne de production et d'en tirer des premières conclusions tant au niveau de l'apport que de la complexité de mise en place.

Tout d'abord, les algorithmes développés et caractérisés dans les chapitres 2 et 3 ont été utilisés pour **mesurer l'OPO de manière dense** sur un produit de STMicroelectronics. Au total, 1926 mesures SEM sur trois motifs ont été réalisées sur 36 puces afin d'obtenir des signatures intra-champ, intra-puce et au sein d'un bloc logique. L'analyse de ces mesures vis-à-vis des mesures optiques de l'overlay a permis de démontrer **un biais (NZO) de quelques nanomètres**, dépendant du motif mesuré. En particulier, le motif n°1 présente un biais de -1.93 nm avec la mesure BCE. De plus, la **variabilité de l'écart entre la prédiction optique et l'OPO** a été évaluée à environ 3 nm à 3σ sur les motifs 1 et 2. Finalement, **une signature intra-puce de faible amplitude** ($\approx 1\text{nm}$) a été mise en évidence. Cette signature présente un cisaillement vertical et un grandissement, commun à l'ensemble des trois motifs et particulièrement présent sur le motif n°2.

Ensuite, nous avons proposés deux **applications industrielles de mesures SEM-OVL**. Dans un premier temps les mesures précédentes ont été utilisées pour générer **un modèle hybride**, combinant mesures SEM et optiques, afin de minimiser l'overlay sur le produit (OPO) tout en maintenant un résiduel optique dans les spécifications. Nous montrons qu'un tel modèle permet de réduire le NZO et de contenir l'OPO à une amplitude inférieure à 5 nm à 3σ . Dans un second temps nous avons implémenté BCE au sein de l'infrastructure ImageLab. Ainsi nous avons pu **greffer la mesure de l'overlay au SEM sur les mesures CD en ligne**. Cette seconde solution d'application de la mesure de l'overlay SEM permet de quantifier le NZO, de suivre son évolution et d'évaluer l'impact des variations de procédé sur l'OPO.

Finalement, nous avons eu accès à un SEM dédié à la mesure overlay. L'accès à de hautes tensions nous a permis de mesurer l'overlay Contact sur Grille sur une plaque de production présentant une signature overlay en double "vortex". Nous avons profité de cette excursion et de cette mesure de référence pour **quantifier la représentativité des différentes mires optiques** et pour vérifier la présence de cette signature sur le produit. Un gain de 0.62 nm sur l'overlay dans la SRAM peut être réalisé en corrigeant le NZO de l'overlay optique. De plus, un modèle SEM permettrait d'obtenir un écart-type de 0.53 nm sur un modèle CPE linéaire. Enfin, l'utilisation de la mesure SEM comme référence nous permet d'évaluer la représentativité des mires optiques. Dans notre étude, la mire μDBO offre une **diminution du résiduel sur l'OPO** de 16% par rapport à la mire AIM lors d'une correction CPE linéaire.

Chapitre 5

Conclusions et perspectives

5.1 Conclusion générale

Le besoin d'une fiabilité accrue des puces pour les marchés automobiles pousse les industriels à développer un meilleur contrôle de la fabrication. Ajouté à cela le besoin de miniaturisation pour rester compétitif, le maintien de l'overlay au sein des spécifications se complique.

L'une des solutions envisagées est la mesure par microscope électronique à balayage (SEM) en complément des mesures optiques habituellement utilisées afin d'apporter une information de l'overlay sur le produit (OPO). Cette thèse a permis d'évaluer la complexité et l'intérêt pour l'industriel STMicroelectronics d'introduire en production la mesure SEM de l'OPO. Après avoir étudié le rôle de l'overlay et son plan de contrôle, l'analyse de l'état de l'art sur les méthodes de mesures optiques et SEM de l'overlay nous a mené à trois principales interrogations. Pour y répondre, un nouvel algorithme de mesure basé sur le Barycentre d'une Référence Réalignée (BRR) a été développé. Cet algorithme a été optimisé, qualifié sur des images synthétiques et appliqué sur des images SEM provenant de puces de STMicroelectronics. Une fois cette métrologie mise en place, les mesures SEM-OVL au sein du produit ont pu être analysées vis-à-vis des mesures optiques de référence. Nous pouvons finalement répondre à ces questionnements :

Est-il possible de réaliser de la mesure SEM-OVL sur le produit avec les équipements actuellement disponibles à STMicroelectronics ?

Pour faire simple : oui, mais avec plusieurs limitations. Si nous avons en effet démontré que les CD-SEM utilisés en production couplés à une extraction de contour permettent de mesurer l'overlay sur le produit, quatre limites majeures ont été mises en évidence.

- 1. La restriction sur les niveaux :** Pour pouvoir être mesurée avec des tensions d'accélération inférieures à 5 keV, la plaque doit être observée post-gravure et seulement sur des niveaux particuliers. Les niveaux réalisés en *double patterning* et ceux réalisés en amont du niveau Contact (FEOL) sont généralement adaptés. L'utilisation de l'algorithme BRR devrait permettre de mesurer les niveaux métalliques avant remplissage. Des premiers résultats sont abordés en perspectives.
- 2. La restriction sur les motifs :** Dans la puce, les motifs ne sont pas conçus pour être mesurés : la longueur de bords disponibles est généralement faible, ils sont courbés, généralement partiellement masqués par un autre niveau et peuvent être réalisés par plusieurs lithographies. Si la méthode BRR vise à atténuer cette limite sur les CD-SEM disponibles, cette contrainte est présente même pour les équipements dédiés tels que le PROvision où la mesure au sein d'un motif dans le produit reste un défi.
- 3. Le temps de mesure :** Les CD-SEM sont conçus pour effectuer une vingtaine de mesures par plaque pour un échantillonnage du CD, et non une centaine comme le fait un équipement de métrologie overlay. Il est donc nécessaire d'imaginer d'autres façon de contrôler l'overlay, par exemple en réalisant le suivi d'une tendance d'une vingtaines de points par plaques.
- 4. Distorsions d'image :** Les CD-SEM d'anciennes générations présentent des déformations des motifs, en particulier sur les bords. Ces déformations abordées brièvement Section 2.1.2 page 54 ont été observées dans le cas de matrices de motifs et seront discutées en perspectives.

Quelle est l'amplitude de l'OPO et du NZO ?

L'overlay sur le produit (l'OPO) et le biais entre la mesure optique et SEM sur le produit (le NZO) ont été évalués à plusieurs reprises dans ce manuscrit.

Le suivi en ligne sur trois mois de l'overlay Y VI01 sur VI02 montre un NZO moyen de -1.9 nm. De la même manière, l'étude Section 4.1 a montré des biais différents selon le motif : (0.1 nm, -1.9 nm) pour le motif n°1, (1.0 nm, -1.3 nm) pour le motif n°2 et (0.34 nm, -4.5 nm) pour le motif n°3. Finalement, une troisième étude avec une autre plaque et une mesure industrielle de l'overlay montre aussi un NZO de -0.6 nm selon l'axe X.

L'amplitude de la variation de l'overlay au sein du produit a elle aussi été étudiée Chapitre 4. La Section 4.2.1 a permis de quantifier la variabilité au sein d'une puce : le motif n°1 montre une variabilité $3\sigma_{total} = 1.51$ nm. Si l'on retire la variabilité de la métrologie, considérée à $3\sigma_{mesure} = 0.9$ nm selon les études de bruit algorithmiques menées Section 3.1, on obtient une variabilité du procédé de $3\sigma_{process} = \sqrt{(3\sigma_{total})^2 - (3\sigma_{mesure})^2} = 1.2$ nm.

Cette même étude a par ailleurs montré l'existence de signatures intra-puces de faibles amplitudes s'apparentant à un grandissement combiné à un cisaillement.

Comment peut-on utiliser cette information pour améliorer le rendement ?

Enfin, cette thèse a abordé l'utilisation industrielle de la mesure SEM-OVL sur le produit. La régulation de l'overlay au sein de la ligne de production fonctionnant depuis des années sur des mesures optiques, rajouter une composante SEM voyant plus de variabilité n'a rien d'aisé. Trois applications concrètes ont été proposées :

La première application de la mesure SEM-OVL consiste à utiliser cette mesure comme référence. Cela correspond principalement aux travaux Section 4.3. La mesure SEM de l'overlay est l'unique méthode permettant un échantillonnage dense de la mesure de l'overlay directement dans la puce. Nous avons ainsi montré une application industrielle : la mesure SEM-OVL a permis de démontrer de manière nette la meilleure représentativité de la mire μ DBO par rapport à la mire AIM.

Une seconde application est le suivi et la correction du biais entre la mesure optique et l'overlay sur le produit. Une fois la mesure de l'overlay SEM ajoutée sur la ligne de production, le biais observé peut être corrigé comme nous le proposons Section 4.2.2. Un overlay optique mieux centré sur l'OPO permettrait une amélioration du rendement, qui peut être significative si le NZO est autour du nanomètre. De nombreuses précautions sont cependant nécessaires. Premièrement, il a été vu que le NZO varie selon le motif mesuré. Il est donc important de choisir le motif le plus critique, ou bien une moyenne de plusieurs afin de minimiser l'OPO de manière globale. Il est important de s'assurer de ne pas provoquer de la défektivité sur un autre motif. Ensuite, la position dans le champ doit être aussi vérifiée : est-ce que le NZO aperçu est réellement présent sur ce motif partout dans le champ, ou est-ce un artefact de correction OVL à l'échelle du champ ? Finalement, il faut s'assurer que ce NZO est stable d'une plaque à une autre, ainsi que dans le temps. Ce travail demande un suivi du NZO en ligne au préalable, tel que présenté Section 4.2.2.

Une dernière solution, consiste à ajouter un modèle SEM au sein de la boucle de régulation overlay. Cette solution vise à gagner les derniers nanomètres provenant d'une signature sur le produit non visible par les mires optiques. Dans les travaux présentés ici, nous montrons que le gain sur l'écart-type de l'OPO serait de l'ordre de 11% pour un modèle hybride SEM/optique par champ.

5.2 Perspectives

Dans cette partie nous allons aborder les perspectives de travaux à la suite de cette thèse. Ces perspectives sont à distinguer en deux catégories : les premières aborderont l'amélioration des capacités de mesure de l'overlay au SEM au sein de la puce, tandis que la dernière traitera des futures applications envisagées à STMicroelectronics.

5.2.1 Amélioration de la qualité d'image

Les images sur lesquelles ont été appliqués les algorithmes de mesures overlay BRR et BCE sont prises sur des recettes SEM proches de celles de production. Il serait intéressant de réaliser une étude sur l'amélioration de ces recettes.

Premièrement, certains capteurs d'électrons rétro-diffusés (BSE) sont désormais disponibles à STMicroelectronics, et de nouveaux CD-SEM équipés de cette technologie arrivent. Même à faible tension (< 5 keV), les électrons BSE permettent de mieux observer le fond des structures et permettraient donc d'obtenir un meilleur contraste sur le niveau inférieur. En plus d'améliorer la qualité de la mesure, l'utilisation de ces capteurs réduirait le problème d'électrisation de la plaque (cf. Section 3.3.3 page 98) et donc permettrait de quantifier l'incertitude de manière rigoureuse. L'extraction de contour actuellement utilisée est basée sur un modèle développé essentiellement sur des images à électrons secondaires. La courbe de niveau de gris variant avec le type d'électrons observés, il sera important de vérifier la compatibilité de l'algorithme d'extraction de contour avec des électrons BSE.

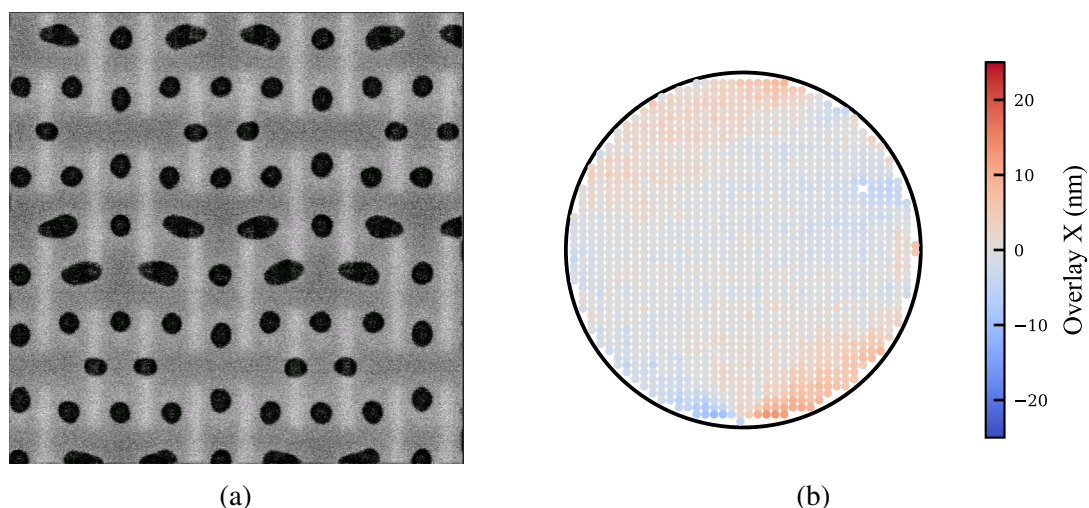


FIGURE 5.1 (a) Image SEM haute tension de la SRAM utilisée pour la mesure de l'overlay sur le SL10. (b) Cartographie des mesures de l'overlay X Contact sur Grille dans la SRAM.

Deuxièmement, la thèse a mis en évidence l'intérêt à STMicroelectronics d'utiliser le SEM overlay pour la production. Les travaux de la Section 4.3 ont en particulier permis l'utilisation d'un autre équipement habituellement réservé à la défectivité et disponible à STMicroelectronics, le KLA SL10. Cet équipement permet des accélérations jusqu'à 30 keV et possède des capteurs BSE. Des premières mesures de l'overlay Contact-Grille en X ont été effectuées sur une plaque du même lot que celle utilisée Section 4.3. Les résultats sont brièvement présentés Figure 5.1. La signature retrouvée correspond à celle observée par les mesures optiques. Ce SEM n'étant pas qualifié pour la mesure, une étude d'incertitude et de stabilité de l'instrument sera nécessaire pour pouvoir utiliser les mesures à des fins industrielles.

5.2.2 Prise en compte des distorsions SEM

Les SEM présentent des distorsions d'images qui peuvent induire des erreurs de mesure d'overlay. Ces effets sont connus sur la mesure du CD, et pour cette raison seuls les motifs centraux de l'image sont généralement mesurés. Cependant, l'impact sur la mesure de l'overlay sur de larges motifs doit être quantifié, en particulier lorsque ces motifs sont non symétriques. Ces distorsions sont notamment visibles sur la matrice de VIA servant à la mesure CD après lithographie des niveaux BEOL.

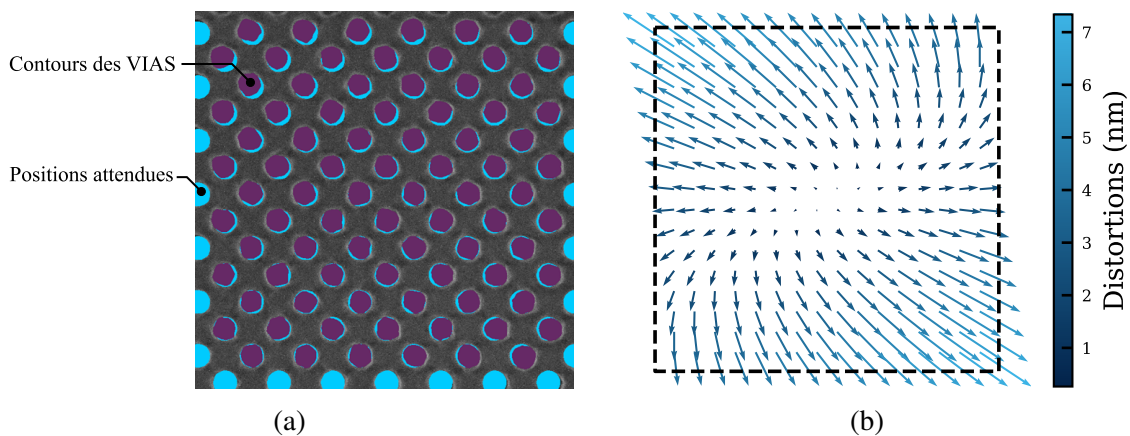


FIGURE 5.2 (a) Illustration de la distorsion d'images SEM sur un niveau VIA post-lithographie. En mauve les contours extraits, en cyan le placement théorique des VIAS (b) Modèle linéaire à 6 paramètres de la distorsion ajusté sur les 17 images d'une recette SEM.

La Figure 5.2a présente une image SEM où sont représentés en mauve les contours extraits des VIAs superposé avec la matrice théorique. L'image est prise sur un Hitachi CG5000 de la production, à 0.3 keV avec un FoV de $1.35 \mu\text{m}$ et à une vitesse de balayage de

1 TV. La déformation de l'image est visible sur les bords : les VIAs sont systématiquement imagés plus à l'extérieur qu'ils ne le sont en réalité. Pour quantifier cette déformation, l'erreur de placement du barycentre de chacun des VIA est calculée et nous considérons qu'à une échelle aussi locale que $1\ \mu\text{m}$ la signature est due exclusivement aux distorsions SEM. Un modèle linéaire à 6 paramètres est ajusté sur l'ensemble des 17 images d'une recette CD-SEM de production sur ce niveau. Ce modèle est représenté Figure 5.2b sur une grille virtuelle. La méthodologie de correction des distorsions est détaillée dans la thèse de E. Soltani et dans notre publication de 2023 dans lequel nous mettons en évidence l'impact du rinçage des plaques sur les distorsions SEM [20, 85].

Il semble que ces distorsions d'images soient moins fortes sur les images SEM post-gravure. Cependant, le phénomène est toujours présent. Dans ce cas d'étude nous avons mis en avant uniquement les distorsions pour une image comprenant un seul niveau. Dans le cas d'images contenant plusieurs niveaux telles que celles utilisées pour la mesure overlay, il est probable que le niveau inférieur subisse des déformations et une électrification différentes du niveau supérieur. En particulier, il serait intéressant d'étudier la déformation des motifs d'un niveau inférieur à proximité des motifs du niveau supérieur telles que les grilles.

5.2.3 Avenir de l'algorithme BRR

L'algorithme BRR a été développé dans le cadre de cette thèse pour permettre la mesure overlay directement sur le produit à l'aide des CD-SEM de production. Nous avons démontré son potentiel mais du travail reste à faire pour industrialiser la mesure.

Qualification rigoureuse selon les standards STMicroelectronics

Premièrement la mesure BRR nécessite une évaluation rigoureuse de ses performances sur un motif du produit tel que le motif n°1 de la Section 4.1. Pour calculer le Tool Measurement Uncertainty (TMU) il faut aussi prendre en compte le Tool Induced Shift (TIS). Nous proposons la méthode suivante : l'ensemble des sites de mesures sont mesurés sur 17 champs. Pour chaque site, la mesure est répétée 10 fois dont 5 avec une rotation de la plaque de 180° afin de prendre en compte le TIS. Cette mesure de répétabilité est répétée 3 fois, avec chargement et déchargement de la plaque sur trois roulements distincts de production afin d'évaluer la reproductibilité de la mesure. La valeur de l'incertitude de la mesure correspond alors au 3σ le plus élevé des sites de mesure. Pour pouvoir réaliser cette évaluation, il sera nécessaire de régler le problème d'électrification du niveau inférieur.

Optimisation de l'algorithme de recalage

L'algorithme de recalage a été optimisé une première fois Section 3.1. Il y a probablement d'autres alternatives pour le recalage qui pourraient donner de meilleurs résultats. Il serait intéressant d'évaluer une méthode basée sur l'utilisation de plusieurs jauges placées le long du contour de référence. De plus, l'algorithme est implémenté en Python. Malgré l'utilisation d'un maximum de fonctions compilées en C, son exécution est relativement lente (1 s à 10 s par image). Réduire le temps de calcul permettrait de travailler à des résolutions plus élevées et améliorerait la précision de la mesure. Une implémentation en Java permettrait de plus son utilisation au sein de l'écosystème SIMPL, le logiciel d'extraction de contour mis en écoute sur l'infrastructure ImageLab.

Extension de la mesure aux niveaux BEOL

L'algorithme BRR rend possible la mesure de l'overlay sur les niveaux d'interconnexions (BEOL). Nous avons testé l'algorithme sur la mire de mesure CD. Celle-ci, visible Figure 5.3a, est constituée d'une matrice de maillons formés par une courte ligne avec deux VIAs.

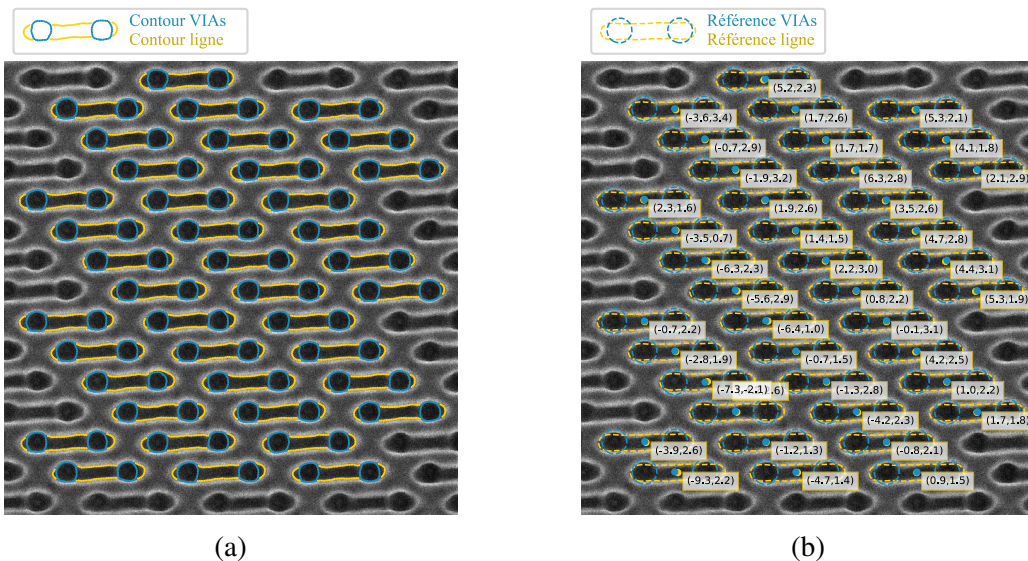


FIGURE 5.3 L'algorithme BRR a été appliqué sur les premiers niveaux d'interconnexions (a) Contours extraits sur les maillons (b) Résultats de la mesure BRR et référence utilisée.

Le procédé de fabrication de ces maillons consiste à réaliser la ligne avant les VIAs à l'aide de deux séquences successives de lithographie-gravure. Après la dernière gravure il est donc possible d'observer les deux niveaux simultanément. Le contour de la ligne est cependant déformé lors de la gravure du niveau VIA. Le recalage de la référence permet alors de retirer cette influence sur la position du barycentre de la ligne.

L'étude de faisabilité a été entamée et mériterait d'être approfondie. La Figure 5.3a présente les contours des VIAs et des lignes extraits sur les images SEM de production. Les résultats de la mesure sur cette image SEM sont donnés Figure 5.3b. La forte variabilité de l'overlay observée sur cette mesure, en particulier selon l'axe X, provient des distorsions de l'image SEM. Comme l'a montré la Section 5.2.2, il est nécessaire de corriger les distorsions par image. Pour cela, la signature de l'overlay par image a été modélisée puis retranchée à l'overlay mesuré.

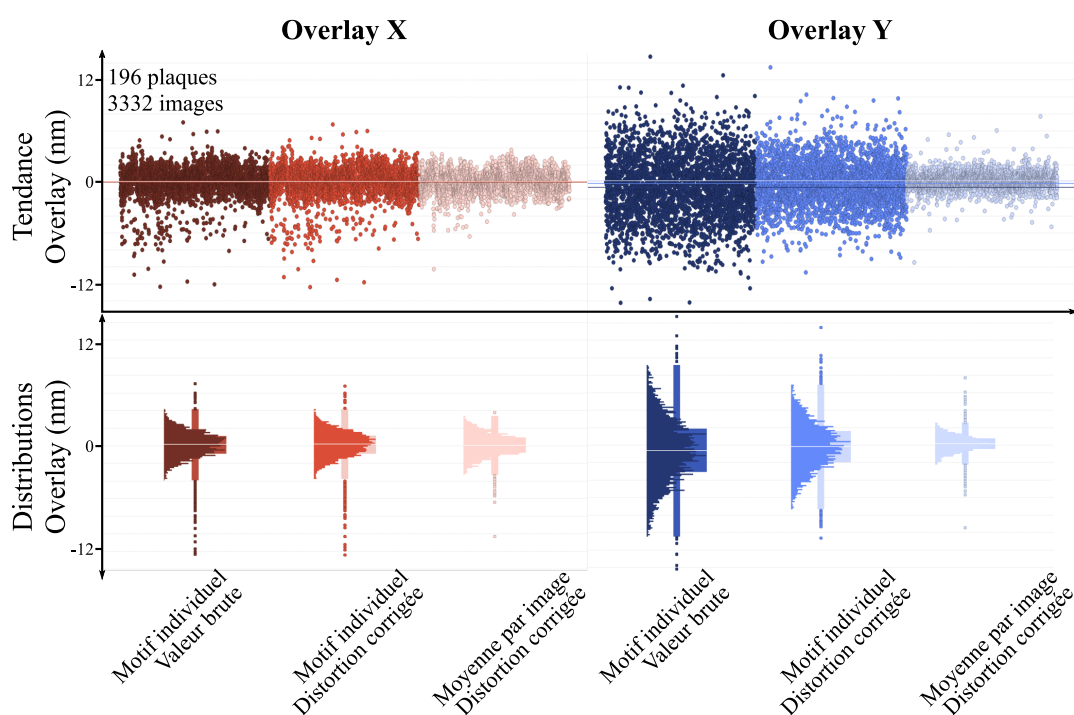


FIGURE 5.4 Tendances et distributions de l'overlay sur le premier niveau d'interconnexions mesuré à l'aide de l'algorithme BRR. Pour chaque axe sont représentés les valeurs brutes par maillon, les valeurs brutes par maillon corrigées de la distorsion d'image et les moyennes par image après correction.

Ces mesures ont été réalisées sur 6 mois de production et les résultats sont présentés Figure 5.4. L'ensemble des images provenant des mesures CD d'un produit ont été sélectionnées, soit un total de 3332 images pour 196 plaques mesurées. Grâce à cette mesure additionnelle sur la ligne de production, il serait possible d'évaluer la variabilité locale de l'overlay, de suivre le NZO en ligne, ainsi que de quantifier l'OPO de l'overlay tout en maintenant un faible impact sur le temps de mesure des plaques.

Ces résultats, au même titre que ceux présentés Section 4.2.2 page 129 sont des pistes intéressantes d'applications en ligne de l'overlay à moindre coût qui méritent d'être explorées. Pour pouvoir les appliquer sur le long terme, il faudrait qualifier la mesure en évaluant sa

précision et son incertitude puis officialiser auprès de la production l'ajout de cette mesure. L'utilisation de capteurs BSE et d'une plus haute tension pourraient être intéressants dans ce cas afin d'améliorer la précision du contour du fond des VIAs.

Avenir au sein de STMicroelectronics

L'algorithme BRR est toujours en cours de développement et n'a pas la maturité nécessaire pour être appliqué en production, comme le montre l'étendue des perspectives évoquées précédemment. L'avenir de cet algorithme serait plutôt d'être repris par un fournisseur d'équipement afin de le rendre plus performant. L'algorithme n'est pas breveté.

En revanche, l'algorithme simple de mesure de l'overlay basé sur le Barycentre du Contour Extrait (BCE) déjà implémenté au sein de STMicroelectronics est utilisable. Avec un tel algorithme et sans améliorer les capacités d'imageries des SEM, la mesure SEM-OVL demeurera restreinte aux niveaux abordés en conclusion.

5.2.4 Détection automatique des motifs pour la mesure dans le produit

La sélection et la création de recette SEM sur les motifs du produit restent un défi. Pour cela il a été envisagé d'utiliser les outils de reconnaissance de motif disponibles au sein des outils de l'équipe OPC. L'idée est de qualifier la mesure SEM sur un motif du produit relativement commun. Ensuite, un algorithme vient automatiquement chercher les positions de ce motif dans les différents produits de la ligne de production. Ainsi le temps de mise en place de la mesure sur le produit est simplifié. Cette solution est indépendante de l'algorithme utilisé pour la mesure SEM-OVL.

5.2.5 Utilisation de la mesure SEM au sein de STMicroelectronics

Finalement, une fois la capacité à mesurer l'overlay au SEM mise en place, il faudra réussir à l'appliquer efficacement au sein de la production afin d'améliorer les rendements et la fiabilité des puces. Quatre étapes majeures ont été identifiées et sont représentées Figure 5.5 par ordre de priorité de mise en place.

La première application consiste à utiliser la mesure SEM-OVL pour l'analyse des causes de défaillance. Cette utilisation est une aide au développement des nouvelles technologies et à la compréhension des excursions. En fournissant une information plus dense que la mesure TEM, les analyses croisées entre overlay et rendements seront plus précises et représentatives. Il serait par ailleurs intéressant de rajouter la mesure du CD en parallèle ce qui permettrait une analyse de la fiabilité d'une puce vis-à-vis de l'EPE, métrique combinant le CD et l'overlay.

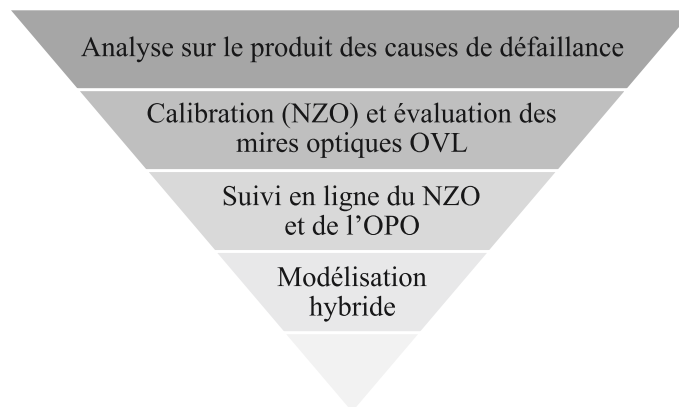


FIGURE 5.5 Quatre étapes majeures de la mise en place de la mesure SEM-OVL au sein de STMicroelectronics par ordre de priorité.

Ensuite, les mesures SEM pourraient être utilisées pour la calibration et l'évaluation des mires overlay optiques. Servant de référence, la mesure SEM ne serait utilisée que lors de qualification des mires optiques afin d'identifier quelle mire est la plus adaptée pour un niveau précis. Cette mesure pourra aussi permettre de prendre en compte le NZO en l'ajoutant dans la boucle de rétro-action comme une valeur fixe. En recentrant le procédé sur les motifs les plus critiques nous pouvons espérer un gain net de rendement. Une telle méthode permettrait aussi de prendre en compte l'impact de la gravure sur l'overlay dès l'exposition du scanner.

La troisième étape consisterait à suivre cette mesure sur la ligne de production. Avec une fréquence de mesure plus faible que la mesure optique, le biais ajouté à la mesure optique pourrait être corrigé selon le NZO mesuré tandis qu'une spécification sur l'OPO permettrait d'anticiper les problèmes de fiabilité et de détecter les dérives sur le produit. Une telle mesure permettrait aussi d'établir une amplitude de référence de l'overlay sur le produit (OPO), ce qui permettrait aux ingénieurs de plusieurs ateliers ayant un impact sur l'overlay (lithographie, gravure, CMP) d'évaluer l'influence de leur modification de recette sur l'OPO.

Finalement la dernière étape serait l'application d'un modèle hybride. Cette étape est très complexe à mettre en place et ne serait intéressante que dans le cas où des signatures présentes sur le produit ont été démontrées au cours des étapes précédentes. Il est à ce jour inconcevable de mesurer l'overlay au SEM avec le même échantillonnage que la mesure optique. Le modèle hybride serait alors basé sur une signature SEM constante qui serait mise à jour à une fréquence définie pour suivre la dérive du procédé.

Bibliographie

- [1] European Commission. EU Chips Act : le plan de l'Europe pour redevenir leader mondial des semi-conducteurs, 2022.
- [2] Gordon E. Moore. Cramming more components onto integrated circuits, 1998.
- [3] Jan Mulkens, Acknowledgements Martin Van Den Brink, Vidya Vaenkatesan, Antonio Corradi, Richard Van Haren, and Adam Lyons. Understanding the Edge Placement Error (EPE) budget for current and future node logic and memory devices. In *vZTech virtual Zeiss SMS Tech Conference*, 2020.
- [4] Juan Antonio Carballo, Wei Ting Jonas Chan, Paolo A. Gargini, Andrew B. Kahng, and Siddhartha Nath. ITRS 2.0 : Toward a re-framing of the Semiconductor Technology Roadmap. In *2014 32nd IEEE International Conference on Computer Design, ICCD 2014*, pages 139–146, 2014.
- [5] NobelPrize.org. The nobel prize in physics 1956, 2023. Accessible sur <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1956/summary/>.
- [6] Michael Brian Schiffer. *The Portable Radio in American Life*. University of Arizona Press, 2022.
- [7] François Bus. *L'époque où les puces font leurs lois : histoire des semi-conducteurs vécue de chez Texas Instruments*. BoD - Books on Demand, 2020.
- [8] Vaclav Smil. *Transforming the Twentieth Century : Volume 2 : Technical Innovations and Their Consequences*. Number vol.~2 in Fortsetzung von : Smil, Vaclav : Creating the twentieth century. Oxford University Press, USA, 2006.
- [9] Dylan Patel. Apple's A14 Packs 134 Million Transistors/mm², but Falls Short of TSMC's Density Claims – SemiAnalysis, oct 2020.
- [10] Robert H. Dennard, Fritz H. Gaensslen, Hwa Nien Yu, V. Leo Rideout, Ernest Bassous, and Andre R. Leblanc. Design of Ion-Implanted MOSFET's With Very Small Physical Dimensions. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 9(5) :256–268, 1974.
- [11] Paolo A. Gargini. Roadmap evolution : from NTRS to ITRS, from ITRS 2.0 to IRDS. page 44, 2017.
- [12] Samsung. [Infographic] Reduced Size, Increased Performance : Samsung's GAA Transistor, MBCFET™ – Samsung Global Newsroom, 2019.

- [13] Guido Rademaker. *Métrieologie avancée pour la lithographie par multi-faisceaux d'électrons*. PhD thesis, 2019.
- [14] Soitec - Connect RF-SOI. Accessible à l'adresse <https://www.soitec.com/fr/produits/connect-rf-soi>.
- [15] ASML. ASML Annual Report. Technical Report December, ASML, 2020.
- [16] Wikipedia - Multiple patterning, 2023.
- [17] Chris Bencher, Yongmei Chen, Huixiong Dai, Warren Montgomery, and Lior Huli. 22nm half-pitch patterning by CVD spacer self alignment double patterning (SADP). In Harry J Levinson and Mircea V Dusa, editors, *Optical Microlithography XXI*, volume 6924, page 69244E. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2008.
- [18] Automotive Electronics Council. Failure Mechanism Based Stress Test Qualification for Integrated Circuits. *AEC - Q100 Rev-H*, pages 1–42, 2014.
- [19] Harry J. Levinson. *Principles of lithography : Third edition*. 2011.
- [20] Soltani Elvire, Le Gratiet Bertrand, Bérard-Bergery Sébastien, and Pradelles Jonathan. *Quantification des variabilités locales à partir d'images CD-SEM pour la fiabilité des technologies 28 FD-SOI*. PhD thesis, 2023.
- [21] Bertrand Le-Gratiet, Olivier Mermert, Christian Gardin, Simon Desmoulins, Ton Kiers, Yongjun Wang, Peng Tang, Hung Yu Tien, Fuming Wang, Christopher Prentice, Wim Tel, and Stefan Hunsche. Investigating process variability at ppm level using advanced massive eBeam CD metrology and contour analysis. page 44, 2019.
- [22] Onintza Ros, Pascal Gouraud, Bertrand Le-Gratiet, Christian Gardin, Julien Ducoté, and Erwine Pargon. Effect of etch pattern transfer on local overlay (OVL) margin in 28nm gate integration. In Gottlieb S Oehrlein, Qinghuang Lin, and Ying Zhang, editors, *Advanced Etch Technology for Nanopatterning III*, volume 9054, page 905406. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2014.
- [23] Elvire Soltani, Bertrand Le-Gratiet, Sébastien Bérard-Bergery, Jonathan Pradelles, Romain Bange, Nivea Schuch, Thiago Figueiro, and Raluca Tiron. Highlighting stochastic manifestations in 193 nm immersion lithography with contour-based metrology metrics. In John C. Robinson and Matthew J. Sendelbach, editors, *Metrology, Inspection, and Process Control XXXVI*, volume 12053, page 1205308. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2022.
- [24] Philippe Leray. Metrology challenges for in-line process control. *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXXI*, 10145(April 2017) :1014503, 2017.
- [25] Joint Committee for Guides in Metrology. International vocabulary of basic and general terms in metrology (VIM), 2004.

- [26] Robert H. Munnig Schmidt. Ultra-precision engineering in lithographic exposure equipment for the semiconductor industry. *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1973) :3950–3972, 2012.
- [27] S. Wittekoek, J. van der Werf, and R. A. George. Phase Gratings As Waferstepper Alignment Marks For All Process Layers. *Optical Microlithography IV*, 0538(July 1985) :24, 1985.
- [28] David Laidler. Identifying sources of overlay error in FinFET technology. In Richard M Silver, editor, *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIX*, volume 5752, page 80. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2005.
- [29] Koen D’havé and Shaunee Cheng. Modeling for field-to-field overlay error. In Will Conley, editor, *Optical Microlithography XXV*, volume 8326, page 83260U. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2012.
- [30] William Chou, Hsien-Min Chang, Chao Yin Chen, M Wagner, K.-D. Roeth, S Czerkas, M Ferber, M Daneshpanah, F Laske, R Chiang, and S Klein. Mask contribution to intra-field wafer overlay. In Jason P Cain and Martha I Sanchez, editors, *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVIII*, volume 9050, page 90501Q. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2014.
- [31] Hiro Tanaka, Takahiro Hidaka, Satoshi Izumi, and Shinsuke Sakai. Onset of Wiggling in a Microscopic Patterned Structure Induced by Intrinsic Stress During the Dry Etching Process. *Journal of Applied Mechanics*, 81(9), 2014.
- [32] Olivier Mermet, Maxime Gatefait, Didier Dabernat, Florent Dettoni, Benjamin Duclaux, and Bertrand Le-Gratiet. Mitigating gain, effort and cost for EOW overlay control. In *Proc.SPIE*, volume 11325, page 56, mar 2020.
- [33] Jessica Timings. TWINSCAN : 20 years of lithography innovation, 2021.
- [34] Friso Klinkhamer, Bart Smeets, Theo Thijssen, Francis Fahrni, Wim de Boeij, Mohamed El Kodadi, Thilo Pollak, and Wolfgang Emer. On-scanner high-spatial-frequency overlay control using a distortion manipulator. In Anna Lio and Martin Burkhardt, editors, *Optical and EUV Nanolithography XXXV*, volume 12051, pages 172–181. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2022.
- [35] David S. Perloff. A Four-Point Electrical Measurement Technique for Characterizing Mask Superposition Errors on Semiconductor Wafers. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 13(4) :436–444, 1978.
- [36] Don MacMillen and W D Ryden. Analysis Of Image Field Placement Deviations Of A 5x Microlithographic Reduction Lens. In Harry L Stover, editor, *Optical Microlithography I : Technology for the Mid-1980s*, volume 0334, pages 78–89. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 1982.
- [37] Alexander Starikov. Metrology of image placement. In *Handbook of Silicon Semiconductor Metrology*, pages 335–388. CRC Press, 2001.

- [38] Shlomit Katz, Nikhil Aditya Kumar Roy, Steve McCandless, Jason Reece, Nathan Gillespie, Nils Monserud, Yoav Grauer, Mark Stakely, Greg Gray, Yonglei Li, Peter Kimani, Nahee Park, Iwata Yasuhisa, Imura Koichi, Ito Kosuke, and Yuqian Zhang. OPO robustness and measurability improvement via extended wavelengths. In John C Robinson and Matthew J Sendelbach, editors, *Metrology, Inspection, and Process Control XXXVII*, volume 12496, page 1249613. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2023.
- [39] SI Standards. *Semi P28-96 Specification for Overlay-Metrology Test Patterns for Integrated-Circuit Manufacture*. 2007.
- [40] Mike Adel, Mark Ghinovker, Boris Golovanevsky, Pavel Izikson, Elyakim Kassel, Dan Yaffe, Alfred M. Bruckstein, Roman Goldenberg, Yossi Rubner, and Michael Rudzsky. Optimized overlay metrology marks : Theory and experiment. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 17(2) :166–179, 2004.
- [41] C. W. Yeh, Chao-Tien H. Huang, Kengchi Lin, C. H. Huang, Elvis Yang, T. H. Yang, K. C. Chen, and Chih-Yuan Lu. Overlay target design and evaluation for SADP process. *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVI*, 8324(16) :832431, 2012.
- [42] Nigel P. Smith, Brennan L. Peterson, and Gary R. Goelzer. Size matters in overlay measurement. *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVI*, 8324(503) :832418, 2012.
- [43] Nelson M. Felix, Allen H. Gabor, William A. Muth, and Christopher P. Ausschnitt. Smaller, smarter, faster, and more accurate : the new overlay metrology. *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXIV*, 7638 :76380Y, 2010.
- [44] Nuriel Amir, Nimrod Shuall, Inna Tarshish-Shapir, and Philippe Leray. Multi layer overlay measurement recent developments. *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVII*, 8681 :86812V, 2013.
- [45] Efi Megged. *Overlay Metrology Poses Challenges for Advanced Memory*, 2020.
- [46] Zephyr Liu, Eitan Hajaj, Ira Naot, Raviv Yohanan, and Yoav Grauer. OPO reduction by novel target design. (March) :90, 2020.
- [47] Gyun Yoo, Jungchan Kim, Chanha Park, Taehyeong Lee, Sunkeun Ji, Gyoyeon Jo, Hyunjo Yang, Donggyu Yim, Masahiro Yamamoto, Kotaro Maruyama, and Byungjun Park. Real cell overlay measurement through design based metrology. In *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVIII*, volume 9050, page 90501O, 2014.
- [48] Jimmy Hu, Chih-Ming Ke, Willie Wang, Jacky Huang, H L Chung, C R Liang, Victor Shih, H H Liu, H J Lee, L G Terng, Y D Fan, Maurits van der Schaar, Kiwi Yuan, Vivien Wang, Cathy Wang, Mir Shahrjerdy, Andreas Fuchs, Kaustuve Bhattacharyya, and Karel van der Mast. A comprehensive look at a new metrology technique to support the needs of lithography performance in near future. In Alek C Chen, Burn Lin, and Anthony Yen, editors, *Lithography Asia 2008*, volume 7140, pages 157–162. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2008.

- [49] Chih-Ming Ke, Jimmy Hu, Willie Wang, Jacky Huang, H L Chung, C R Liang, Victor Shih, H H Liu, H J Lee, John Lin, Y D Fan, Kaustuve Bhattacharyya, Maurits van der Schaar, Noelle Wright, Kiwi Yuan, Vivien Wang, Cathy Wang, Spencer Lin, Mir Shahrjerdy, Andreas Fuchs, and Karel van der Mast. Evaluation of a new metrology technique to support the needs of accuracy, precision, speed, and sophistication in near-future lithography. In John A Allgair and Christopher J Raymond, editors, *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXIII*, volume 7272, pages 100–106. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2009.
- [50] Jos Maas, Martin Ebert, Kaustuve Bhattacharyya, Hugo Cramer, Arthur Becht, Stefan Keij, Reinder Plug, Andreas Fuchs, Michael Kubis, Tom Hoogenboom, and Vidya Vaenkatesan. YieldStar : a new metrology platform for advanced lithography control. In Uwe F W Behringer, editor, *27th European Mask and Lithography Conference*, volume 7985, pages 146–155. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2011.
- [51] Hyunsok Kim, Ikhyun Jeong, Baikkyu Hong, Sunouk Nam, Sumin Jang, Kangmin Lee, Hongpeng Su, Minh Jeong, Mingyu Kim, Hongcheon Yang, Wayne Zhou, Nanglyeom Oh, Dongsu Choi, Tal Yaziv, Hedvi Spielberg, Ohad Bachar, and Rawi Dirawi. Enhancement of overlay metrology accuracy by multi-wavelength scatterometry with rotated quadrupole illumination. In John C Robinson and Matthew J Sendelbach, editors, *Metrology, Inspection, and Process Control XXXVII*, volume 12496, page 1249620. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2023.
- [52] Paul Hinnen. YieldStar Metrology System Applications for Advanced Process Control Overlay and CD-Uniformity (CDU) are critical for device performance. 2018.
- [53] Antonio Salerno, Zack Hsu, Isabel de le Fuente, Elliott McNamara, Daoping Li, Hammer Chang, Alan Tai, and Hugo Cramer. Enabling optical metrology on small 5x5um² in-cell targets to support flexible sampling and higher order overlay and CD control for advanced logic devices nodes. (March) :53, 2018.
- [54] Daniel Kandel, Mike Adel, Berta Dinu, Boris Golovanevsky, Pavel Izikson, Vladimir Levinski, Irina Vakshtein, Philippe Leray, Mauro Vasconi, and Bartlomiej Salski. Differential signal scatterometry overlay metrology : an accuracy investigation. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V*, 6616(June 2007) :66160H, 2007.
- [55] Philippe Leray, Shaunee Cheng, Daniel Kandel, Michael Adel, Anat Marchelli, Irina Vakshtein, Mauro Vasconi, and Bartlomiej Salski. Diffraction based overlay metrology : accuracy and performance on front end stack. *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXII*, 6922 :69220O, 2008.
- [56] ITRS. 2007 ITRS Metrology. 2007.
- [57] D L Meunier, D Humphrey, B Peck, P Feeney, J Paquette, and J Thibault. Optimization of Metal Layer Overlay and Alignment Targets in a Chemical-Mechanical Polishing Environment. In *Proceedings of the Olin Microlithography Seminar*, pages 355–366, 1996.

- [58] Shao-Wen Hsia, Glenn Miyagi, and Maureen Brongo. Alignment Characterization of CMP Tungsten Process. In *Proceedings of the Olin Microlithography Seminar*, pages 381–390, 1996.
- [59] Mert Karakoy, Yue Zhou, Dongsuk Park, Zhenhua Ge, and Amit Siany. On-Product eBeam Overlay topic/category AM : Advanced metrology. pages 277–284, 2017.
- [60] Chengzhang Wu, Dongyu Xu, Hua Yuan, Yinsheng Yu, Hongwen Zhao, Wenzhan Zhou, Haifeng Pu, Faquan Liu, Jason Pei, Jinyan Song, and Kevin Huang. Hybrid overlay control solution with CDSEM and optical metrology. volume 11611, page 43. SPIE, 2021.
- [61] Seulki Kang, Kotaro Maruyama, Yuichiro Yamazaki, Matteo Beggiato, Anabela Veloso, and Gian Lorusso. Advanced high-voltage e-beam system combined with an enhanced D2DB for on-device overlay measurement. In John C Robinson and Matthew J Sendelbach, editors, *Metrology, Inspection, and Process Control XXXVII*, volume 12496, page 124961W. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2023.
- [62] Osamu Inoue and Kazuhisa Hasumi. Review of scanning electron microscope-based overlay measurement beyond 3-nm node device. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 18(02) :1, 2019.
- [63] Kazuhisa Hasumi, Osamu Inoue, Yutaka Okagawa, Chuanyu Shao, Philippe Leray, Sandip Halder, Gian Lorusso, and Christiane Jehoul. SEM-based overlay measurement between via patterns and buried M1 patterns using high-voltage SEM. In *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXXI*, volume 10145, page 101451J, 2017.
- [64] Osamu Inoue, Yutaka Okagawa, Kazuhisa Hasumi, Chuanyu Shao, Philippe Leray, Gian Lorusso, and Bart Baudempez. SEM based overlay measurement between resist and buried patterns. *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXX*, 9778(April 2016) :97781D, 2016.
- [65] François Weisbuch and Jirka Schatz. Characterizing interlayer edge placement with SEM contours. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 18(02) :1, 2019.
- [66] Bertrand Le-Gratiet, Regis Bouyssou, Julien Ducote, Alain Ostrovsky, Charlotte Beylier, Christian Gardin, Nivea G. Schuch, Vincent Annezo, Loïc Schneider, Matthieu Millequant, Paolo Petroni, Thiago Figueiro, and Patrick Schiavone. Contour based metrology : “make measurable what is not so”. 1132505(May) :3, 2020.
- [67] Jaehyoung Oh, Gwangmin Kwon, Daiyoung Mun, Hyungwon Yoo, Sungsu Kim, Tae hui Kim, Minoru Harada, Yohei Minekawa, Fumihiko Fukunaga, and Mari Nozoe. In-die overlay metrology method using defect review SEM images. In Alexander Starikov and Jason P. Cain, editors, *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVII*, volume 8681, page 868111. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2013.

- [68] Bertrand Le Gratiet, Régis Bouyssou, Julien Ducoté, Alain Ostrovsky, Stephanie Audran, Christian Gardin, Nivea G Schuch, Charles Valade, Jordan Belissard, Matthieu Millequant, Thiago Figueiro, and Patrick Schiavone. Pattern placement and shape distortion control using contour-based metrology. In *Proc.SPIE*, volume 11611, mar 2021.
- [69] Sunkeun Ji, Gyun Yoo, Gyoyeon Jo, Hyunwoo Kang, Minwoo Park, Jungchan Kim, Chanha Park, Hyunjo Yang, Donggyu Yim, Kotaro Maruyama, Byungjun Park, and Masahiro Yamamoto. Advanced overlay analysis through design based metrology. *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXIX*, 9424(March 2015) :942415, 2015.
- [70] Gyoyeon Jo, Sunkeun Ji, Shinyoung Kim, Hyunwoo Kang, Minwoo Park, Sangwoo Kim, Jungchan Kim, Chanha Park, Hyunjo Yang, Kotaro Maruyama, and Byungjun Park. Enhancement of intrafield overlay using a design based metrology system. *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXX*, 9778(March 2016) :97781J, 2016.
- [71] Dr Hai-Bo Zhang, Dr Ren-Jian Feng, and Dr Katsumi Ura. Utilizing the Charging Effect in Scanning Electron Microscopy. *Science Progress*, 87(4) :249–268, 2004.
- [72] Natsuki Tsuno, Yusuke Ominami, Hiroya Ohta, Hiroyuki Shinada, Hiroshi Makino, and Yoshinobu Kimura. Analysis of charging effects on highly resistive materials under electron irradiation by using transient-absorbed-current method. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 29(3), 2011.
- [73] Kwame Owusu-Boahen, Suraj Patil, Arun Vijayakumar, Alex Pate, Carl Han, Jorg Schwitzgebel, Chulwoo Kim, and David Moreau. Using e-Beam inspection and overlay as tool for identifying process weaknesses in semiconductor processing. (March) :55, 2020.
- [74] Moosong Lee, Jinsun Kim, Dohyeon Park, Yeeun Han, Junseong Yoon, Seung Yoon Lee, Chan Hwang, Achim Woessner, Cyrus E Tabery, Miao Wang, Antonio Corradi, Young-Hoon Song, Yun-A Sung, Thomas Kim, Aileen Soco, Jason Kim, and Chih-Hung Hsieh. Absolute overlay measurement based on voltage contrast defect inspection with programmed misalignments for DRAM devices. In John C Robinson and Matthew J Sendelbach, editors, *Metrology, Inspection, and Process Control XXXVI*, volume 12053, page 1205315. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2022.
- [75] Amine Lakcher. *Nouvelles perspectives de métrologie dimensionnelle par imagerie de microscope électronique pour le contrôle de la variabilité des procédés de fabrication des circuits intégrés*. Theses, Université Grenoble Alpes, July 2018.
- [76] Amine Lakcher, Loïc Schneider, Bertrand Le-Gratiet, Julien Ducoté, Vincent Farys, and Maxime Besacier. Advanced metrology by offline SEM data processing. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, pages 10446, art. no. 104460L, 2017.
- [77] Daan M Slotboom, Paul Hinnen, and Jan Mulkens. On-product overlay solutions for DUV and EUV mix-scanner usage in an EPE-driven patterning world. In Anna Lio

- and Martin Burkhardt, editors, *Optical and EUV Nanolithography XXXV*, volume 12051, pages 182–191. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2022.
- [78] Joseph R. Michael Joseph I. Goldstein, Dale E. Newbury, Patrick Echlin, David C. Joy, Charles E. Lyman, Eric Lifshin, Linda Sawyer. *Scanning Electron Microscopy and Microanalysis*. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. Springer New York, NY, 3 edition, 2003.
- [79] Joseph I. Goldstein, Dale E. Newbury, Joseph R. Michael, Nicholas W.M. Ritchie, John Henry J. Scott, and David C. Joy. *Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis*. Springer New York, NY, 4 edition, 2017.
- [80] Wikipedia, scanning electron microscope, Mar 2023.
- [81] ABDALLAH Zeinab, BONNET Stéphane, and FAY Aurelien. *Reconstruction 3D de microlentilles à partir d'images au microscope électronique à balayage*. PhD thesis, 2024.
- [82] W. Schottky. Über spontane Stromschwankungen in verschiedenen Elektrizitätsleitern, January 1918.
- [83] Walter Schottky. On spontaneous current fluctuations in various electrical conductors. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 17(4) :41001, 2018.
- [84] Jerome Reche. *Nouvelle méthodologie hybride pour la mesure de rugosités sub-nanométriques*. Theses, Université Grenoble Alpes, 2019.
- [85] Elvire Soltani, Bertrand Le-Gratiet, Sébastien Bérard-Bergery, Jonathan Pradelles, and Raluca Tiron. Understanding the impact of rinse on SEM image distortion and hole patterning variability. In Uwe Behringer, editor, *38th European Mask and Lithography Conference*. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2023.
- [86] ChungHsi J Wu, Wu-Song Huang, K Rex Chen, Charles N Archie, and Mark E Lagus. Investigation on the mechanism of the 193-nm resist linewidth reduction during the SEM measurement. In Francis M Houlihan, editor, *Advances in Resist Technology and Processing XVIII*, volume 4345, pages 190–199. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2001.
- [87] Takanori Kudo, Ralph Dammel, Jun-Born Bae, M Rahman, Woo-Kyu Kim, Douglas Mckenzie, Eric Alemy, Waiman Ng, and Munirathna Padmanaban. Mechanistic Studies on the CD Degradation of 193nm Resists during SEM Inspection. *Journal of Photopolymer Science and Technology - J PHOTOPOLYM SCI TECHNOL*, 14 :407–417, 2001.
- [88] John Canny. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8(6) :679–698, 1986.
- [89] Yosuke Okamoto, Shinichi Nakazawa, Akinori Kawamura, Tsugihiko Haga, Taihei Mori, Kotaro Maruyama, Seul-Ki Kang, and Yuichiro Yamazaki. Contour extraction algorithm for edge placement error measurement using machine learning. In Ofer Adan and John C Robinson, editors, *Metrology, Inspection, and Process Control for*

- Microlithography XXXIV*, volume 11325, page 113252A. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2020.
- [90] Pierre Geurts, Damien Ernst, and Louis Wehenkel. Extremely randomized trees. *Machine Learning*, 63(1) :3–42, 2006.
- [91] J N Sarvaiya, Suprava Patnaik, and Salman Bombaywala. Image Registration by Template Matching Using Normalized Cross-Correlation. In *2009 International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies*, pages 819–822, 2009.
- [92] Élie Sezestre, Juline Scoarnec, Jonathan Pradelles, Loïc Perraud, Aurélien Fay, Sébastien Bérard-Bergery, Jessy Bustos, Jean-Baptiste Henry, Olivier Dubreuil, Ivania Mendes, Charles Valade, Alexandre Moly, Alice Batte, Nivea Schuch, Frederic Robert, and Thiago Figueiro. Model-based contour extraction : an enabler for very low-frame SEM images metrology. In John C Robinson and Matthew J Sendelbach, editors, *Metrology, Inspection, and Process Control XXXVI*, volume 12053, page 120531G. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2022.
- [93] Francois Weisbuch, Jirka Schatz, Sylvio Mattick, and Nivea Schuch. Investigating SEM-contour to CD- SEM matching. (March), 2021.
- [94] Kevin Houchens, Yaniv Abramovitz, Shay Attal, Ofer Adan, Nahum Bomshtein, Itai Buks, Ryan Hsieh, Tal Itzkovich, and Jenny Perry. SEM overlay target design using e-beam simulation. In John C Robinson and Matthew J Sendelbach, editors, *Metrology, Inspection, and Process Control XXXVII*, volume 12496, page 1249623. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2023.
- [95] Benjamin D Bunday. See-through imaging by HV-SEM : a simulation study. In Ofer Adan and John C Robinson, editors, *Metrology, Inspection, and Process Control for Semiconductor Manufacturing XXXV*, volume 11611, page 1161109. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2021.
- [96] Benjamin D Bunday, Shari Klotzkin, Douglas Patriarche, Yvette Ball, Maseeh Mukhtar, Kotaro Maruyama, Seul-Ki Kang, and Yuichiro Yamazaki. Simulating HV-SEM imaging of HAR and buried features. In John C Robinson and Matthew J Sendelbach, editors, *Metrology, Inspection, and Process Control XXXVII*, volume 12496, page 124960W. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2023.
- [97] O Yu Ridzel, W Yamane, I Mansaray, and J S Villarrubia. Model validation for scanning electron microscopy. In John C Robinson and Matthew J Sendelbach, editors, *Metrology, Inspection, and Process Control XXXVII*, volume 12496, page 124960T. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2023.
- [98] J S Villarrubia, A E Vladár, B Ming, R J Kline, D F Sunday, J S Chawla, and S List. Scanning electron microscope measurement of width and shape of 10nm patterned lines using a JMONSEL-modeled library. *Ultramicroscopy*, 154 :15–28, 2015.
- [99] Hendrix Demers, Nicolas Poirier-Demers, Alexandre Réal Couture, Dany Joly, Marc Guilmain, Niels de Jonge, and Dominique Drouin. Three-dimensional electron microscopy simulation with the CASINO Monte Carlo software. *Scanning*, 33(3) :135–146, 2011.

- [100] S Babin, S Borisov, A Ivanchikov, and I Ruzavin. CHARIOT : Software tool for modeling SEM signal and e-beam lithography. *Physics Procedia*, 1(1) :305–313, 2008.
- [101] Erik Kieft and Eric Bosch. Refinement of Monte Carlo simulations of electron–specimen interaction in low-voltage SEM. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 41(21) :215310, oct 2008.
- [102] P Cizmar, A E Vladár, B Ming, M T Postek, and for the National Institute of Standards and Technology. Simulated SEM images for resolution measurement. *Scanning*, 30(5) :381–391, 2008.
- [103] S Babin, S S Borisov, and V P Trifonenkov. Fast analytical modeling of SEM images at a high level of accuracy. In Jason P Cain and Martha I Sanchez, editors, *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXIX*, volume 9424, page 94240I. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2015.
- [104] T Verduin, S R Lokhorst, and C W Hagen. GPU accelerated Monte-Carlo simulation of SEM images for metrology. In Martha I Sanchez, editor, *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXX*, volume 9778, page 97780D. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2016.
- [105] L. van Kessel and C. W. Hagen. Nebula : Monte Carlo simulator of electron–matter interaction. *SoftwareX*, 12, 2020.
- [106] Y B Zou, M S S Khan, H M Li, Y G Li, W Li, S T Gao, L S Liu, and Z J Ding. Use of model-based library in critical dimension measurement by CD-SEM. *Measurement*, 123 :150–162, 2018.
- [107] Matthias Köfferlein. The klayout python module.
- [108] Geuzaine, Christophe and Remacle, Jean-Francois. Gmsh.
- [109] Thomas Paviot. Python opencascadepythonocc.
- [110] Thibaut Bourguignon, Regis Bouyssou, Jonathan Pradelles, Sébastien Bérard-Bergery, Bertrand Le-Gratiet, Romain Bange, Nivea G. Schuch, Thiago Figueiro, and Nicolas Possémé. Enabling on-device and target-free overlay measurement from CD-SEM contours. In *Proc.SPIE*, volume 12053, page 26, may 2022.
- [111] Guido van Rossum, Barry Warsaw, and Nick Coghlan. PEP 8 – Style Guide for Python Code, 2001.
- [112] Hao Zhu, Bin Guo, Ke Zou, Yongfu Li, Ka Veng Yuen, Lyudmila Mihaylova, and Henry Leung. A review of point set registration : From pairwise registration to groupwise registration. *Sensors (Switzerland)*, 19(5) :1–20, 2019.
- [113] G Le Besnerais and F Champagnat. Dense optical flow by iterative local window registration. In *IEEE International Conference on Image Processing 2005*, volume 1, pages I–137, 2005.

- [114] Stefan Van der Walt, Johannes L Schönberger, Juan Nunez-Iglesias, François Boulogne, Joshua D Warner, Neil Yager, Emmanuelle Gouillart, and Tony Yu. scikit-image : image processing in python. *PeerJ*, 2 :e453, 2014.
- [115] Richardos Drakoulis. icp, 2019.
- [116] Feng Lu and Evangelos Milios. Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans. *Journal of Intelligent and Robotic Systems : Theory and Applications*, 18(3) :249–275, 1997.
- [117] Anthony A. Gatti and Siavash Khallaghi. Pycpd : Pure numpy implementation of the coherent point drift algorithm. *Journal of Open Source Software*, 7(80) :4681, 2022.
- [118] Andriy Myronenko and Xubo Song. Point Set Registration : Coherent Point Drift. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(12) :2262–2275, 2010.
- [119] P J Besl and Neil D McKay. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2) :239–256, 1992.
- [120] Zhengyou Zhang. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 13(2) :119–152, 1994.
- [121] Laurent Azar-Nouche. *Défis liés à la réduction de la rugosité des motifs de résine photosensible 193 nm*. Theses, Université de Grenoble, 2012.
- [122] Chris A Mack. Generating random rough edges, surfaces, and volumes. *Appl. Opt.*, 52(7) :1472–1480, mar 2013.
- [123] Chris A Mack. Biases and uncertainties in the use of autocovariance and height–height covariance functions to characterize roughness. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 34(6) :06K701, 2016.
- [124] Thibaut Bourguignon, Bertrand Le-Gratiet, Jonathan Pradelles, Sébastien Bérard-Bergerie, Guido Rademaker, and Nicolas Possémé. Contour based on-device overlay metrology assessment using synthetic SEM images. page 37, 2022.
- [125] Thibaut Bourguignon, Bertrand Le Gratiet, Jonathan Pradelles, Sébastien Bérard-Bergerie, Charles Valade, Nivea Schuch, and Nicolas Possémé. High spatial frequency on-device overlay characterization using CD-SEM contours. In John C Robinson and Matthew J Sendelbach, editors, *Metrology, Inspection, and Process Control XXXVII*, volume 12496, page 124960J. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2023.
- [126] David W Scott. *Multivariate density estimation : theory, practice, and visualization*. John Wiley & Sons, 1992.
- [127] B. W. Silverman. Density estimation : For statistics and data analysis. *Density Estimation : For Statistics and Data Analysis*, 26 :1–175, 2018.

Annexe A : Corrélations avec les mesures optiques

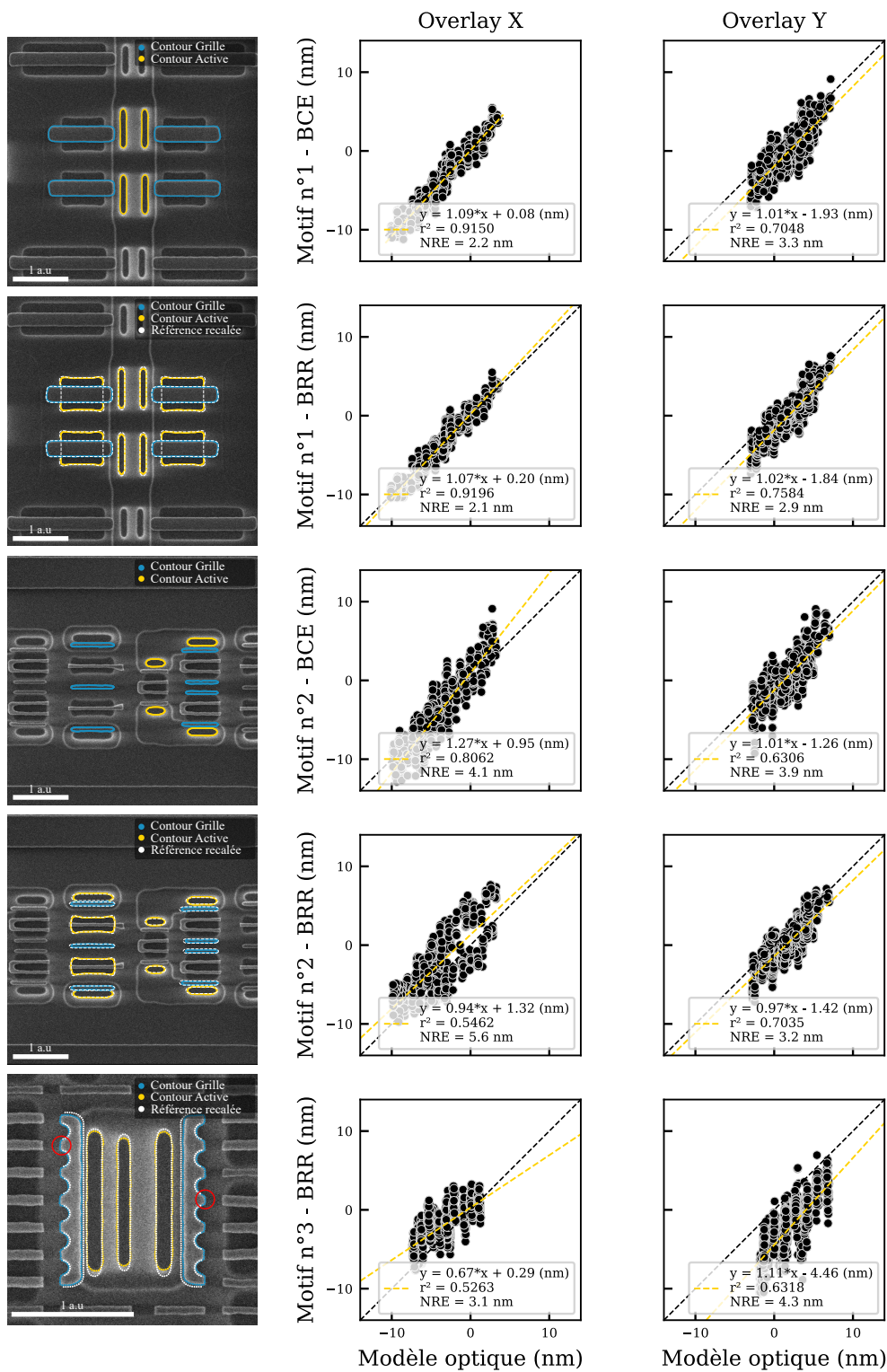


FIGURE A.1 Corrélations des différentes mesures avec l'overlay optique correspondants aux travaux Section 4.1.3.

Annexe B : OVL puce par puce

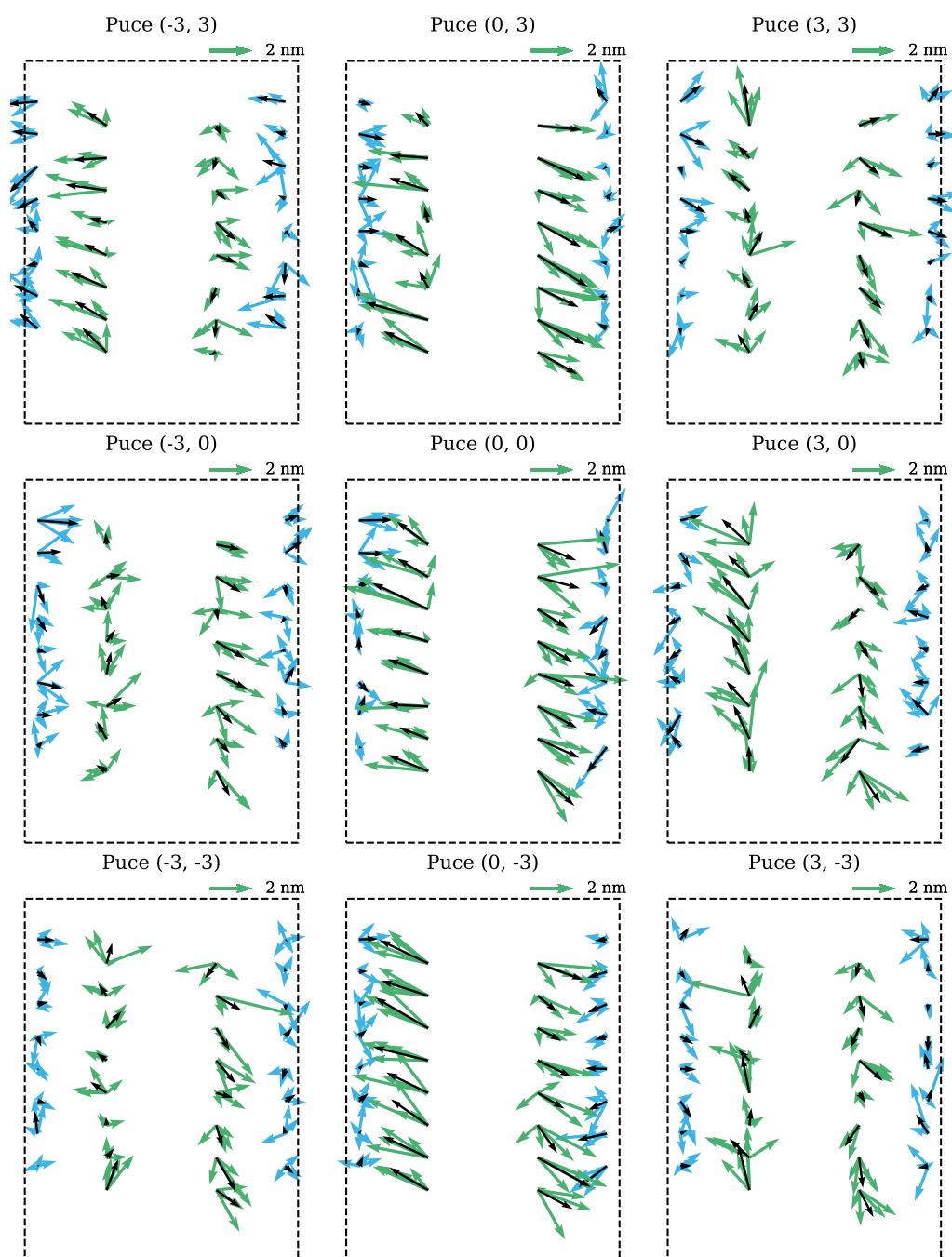
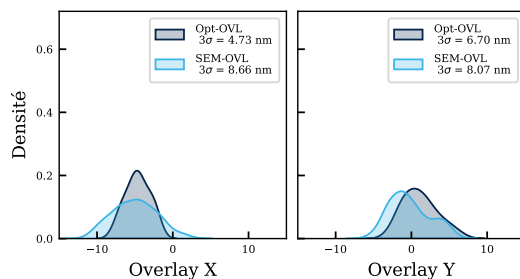
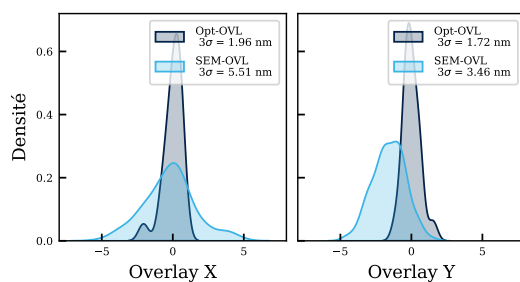


FIGURE B.1 Signature overlay par puce et par motif selon la position dans le champ. Les flèches noires correspondent à la moyenne par site. Relatif aux travaux Section 4.1.5

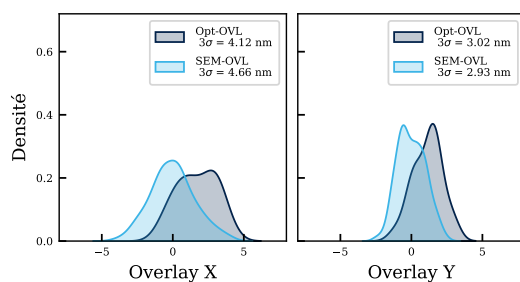
Annexe C : Distributions overlay résiduels



(a) Mesures brutes

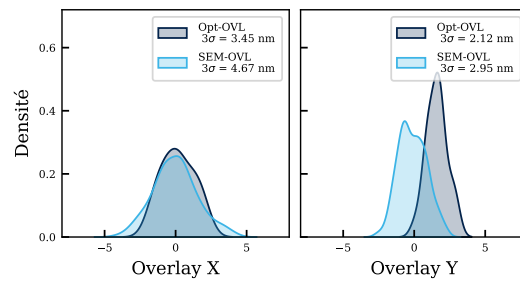


(b) Modèle optique

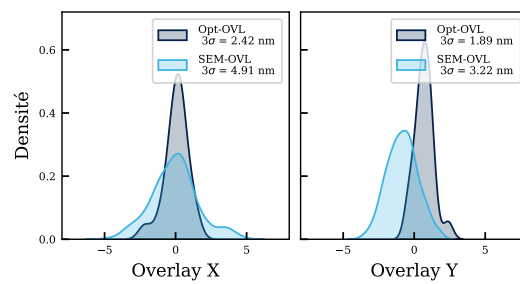


(c) Modèle SEM

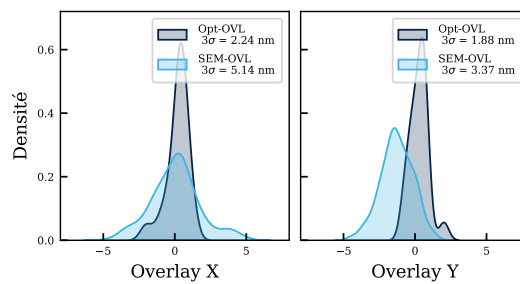
FIGURE C.1 Densité de probabilité des résiduels des mesures optiques et SEM selon le modèle utilisé (1/2). Figure correspondant aux travaux Section 4.2.1



(a) Modèle hybride n°1



(b) Modèle hybride n°2



(c) Modèle hybride n°3

FIGURE C.2 Densité de probabilité des résiduels des mesures optiques et SEM selon le modèle utilisé (2/2). Figure correspondant aux travaux Section 4.2.1

Annexe D : Résiduels par modèle

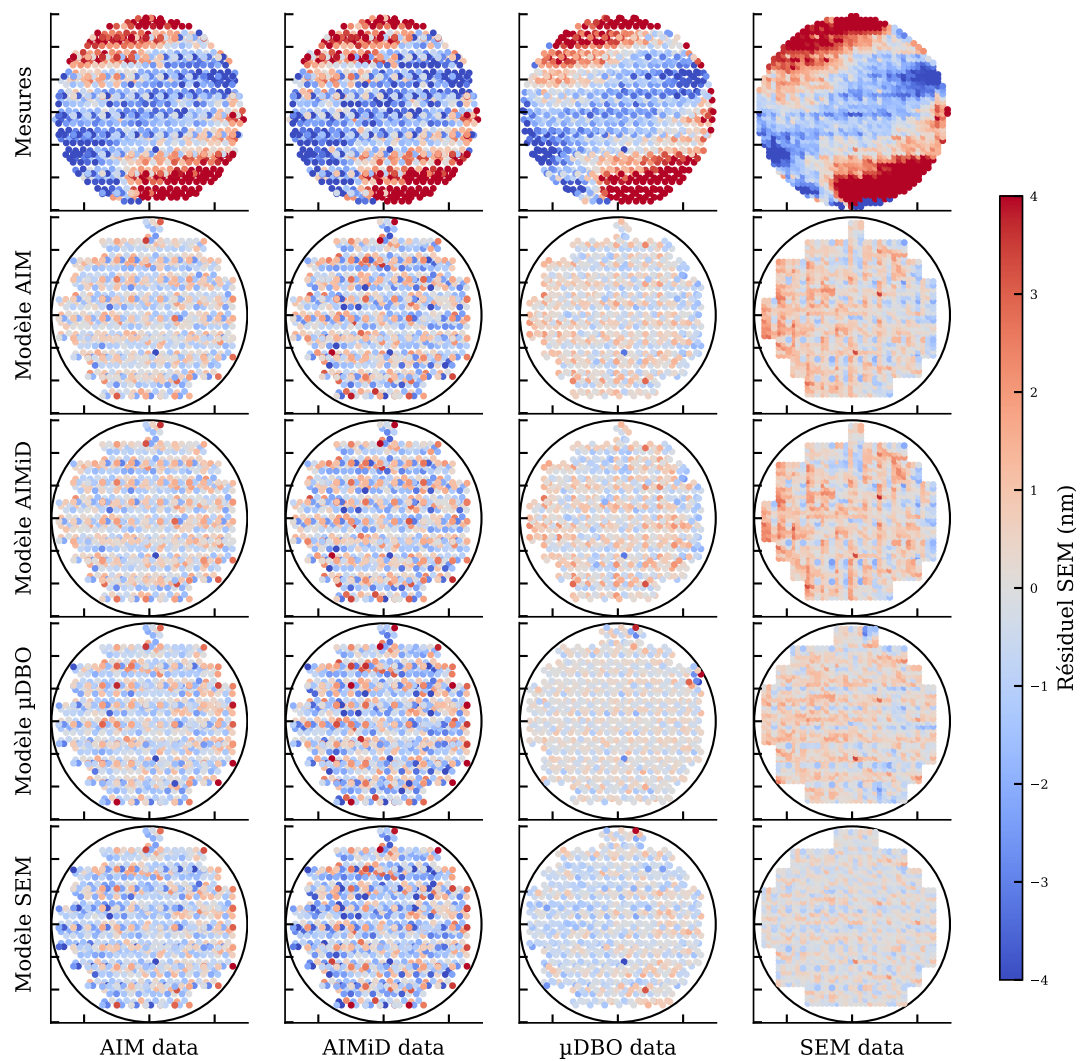


FIGURE D.1 Résiduel sur la mesure selon le modèle utilisé pour la correction dans le cadre des travaux Section 4.3.4. Les distributions correspondantes sont représentées Figure D.2

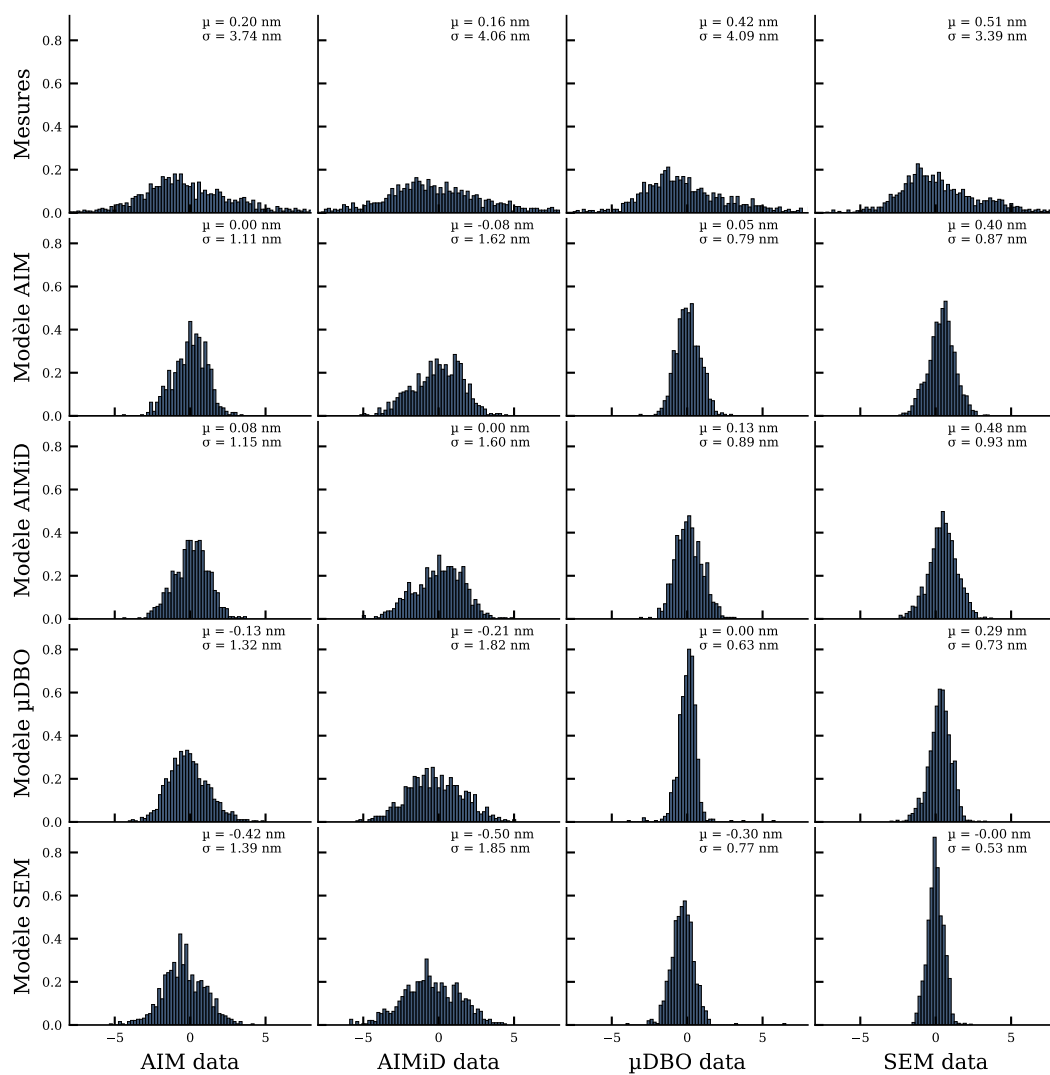


FIGURE D.2 Distribution des résiduels sur les quatre jeux de données après modélisation linéaire CPE sur les différentes mires.

Lexique

μ DBO 3σ	micro Diffraction Based Overlay 34–37, 134–141, 145 Signifie 3 fois l'écart-type de la distribution étudiée. Si l'on émet l'hypothèse d'une distribution gaussienne, alors 0,9973 des valeurs sont comprises entre $\mu - 3\sigma$ et $\mu + 3\sigma$, où μ correspond à la moyenne de la distribution et σ l'écart type. 18, 19, 22, 65, 85, 91, 92, 105, 116, 119–121, 125, 126, 128, 132, 140, 141, 148
ACF Active	Auto Correlation Function 86 Zone où a lieu un implant afin de donner des propriétés de conducteur au silicium. En général, ces zones correspondent au drain et à la source. 10, 174
AIM	Advanced Imaging Metrology 31–33, 35, 36, 45, 76, 89, 91, 92, 105, 110, 111, 134, 136–141, 145, 171
AIMiD	AIM in Die 32, 33, 36, 37, 40, 136–140
APC	Advanced Process Control 22–24, 29, 38
asl	Aselta Scripting Language 69, 71, 73
BCE	Barycentre du Contour Extrait 12, 64, 67–69, 73, 78, 108, 110–114, 117, 118, 121, 122, 129, 130, 135, 141, 146, 151
BEOL	Back-End Of Line 9, 13, 147, 149
BRR	Barycentre d'une Référence Réalignée 11–13, 63, 66–68, 71, 73, 76–95, 97, 99–101, 103–105, 108, 110–118, 121, 143, 144, 146, 148–151
BSE	Back-Scattered Electrons 39, 52, 53, 55, 56, 63, 108, 135, 146, 147, 151

CC	Cross-Correlation 77, 78
CD	Dimension critique 16–20, 23, 29, 38–40, 43, 47, 52, 55, 99, 108, 121, 129, 130, 132, 141, 144, 147, 149–151
CD-SEM	Critical Dimension Scanning Electron Microscope 38, 40, 41, 44, 47, 49, 52, 53, 55, 56, 58, 70, 71, 89, 111, 143, 144, 146, 148
Champ d'exposition	. 12, 25, 26, 29, 38
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor 7–10
CMP	Chemical Mechanical Polishing 13, 19, 31, 37, 38, 152
CoG	Center of Gravity 40
CPD	Coherent Point Drift 78–80, 88, 100, 105
CPE	Correction Par Exposition 27, 115, 116, 118, 122, 128, 138, 139, 141, 169
CPU	Central Processing Unit 59
Cut	Masque additionnel utilisé pour améliorer l'aspect rectangulaire des grilles sur les nœuds avancés en venant les couper perpendiculairement. 15
DBO	Diffraction Based Overlay 30, 34–36, 45, 46
Dennard's scaling	Principe et équations de diminution des dimensions des transistors établis par Robert Dennard en 1974 permettant de suivre la loi de Moore. 9
Design	Terme anglais désignant la conception du produit. En microélectronique, le terme <i>design</i> fait généralement référence aux motifs dessinés sur le <i>layout</i> 49, 66
Dimension Critique	Dimension d'intérêt d'un motif transféré sur la plaque. Généralement utilisé pour désigner le diamètre d'un VIA ou d'un contact, la largeur d'une grille ou d'une ligne. Par abus de langage ce terme est régulièrement utilisé pour décrire toute distance. 16, 172
DRC	Design Rule Checking 16
EM	Expectation Maximization 78, 79
EMET	EMbedded METrology 21, 29, 32, 35, 36, 39

Enduction centrifuge	Technique de formation d'une couche mince et uniforme, par dépôt d'une solution de la substance du film, sur la surface plane d'un substrat qui tourne à vitesse élevée. <i>Spin coating</i> en anglais. 11
EPE	Edge Placement Error 19, 25, 38, 40–42, 46, 151
Equivalent scaling	Principe d'amélioration des performances des transistors pour continuer le suivi de la loi de Moore à partir des années 2000 lorsque les limites physiques freinent la réduction des dimensions. 9
ETL	Extract Transform Load 71
EWS	Electrical Wafer Sort 132, 133
FDC	Fault Detection and Classification 23
FDSOI	Fully Depleted Silicon on Insulator 10
FEOL	Front-End Of Line 9, 13, 144
Fonderie	Nom usuel des industrie fabricant les semi-conducteurs. Plus précisément, les fonderies se différencient des IDMs car ils ne conçoivent pas les puces eux même, mais offrent un service de fabrication. Samsung Foundry et TSMC sont les deux fonderies les plus avancées technologiquement. 11
FOUP	Front Opening Universal Pod 11
FoV	Field of View 39, 45, 50, 55, 89, 135, 147
GAA	Gate-All-Around 9
GMM	Gaussian Mixture Model 78
GPU	Graphics Processing Unit 59, 62
HV-SEM	High-Voltage Scanning Electron Microscope 39, 41, 43, 44, 49, 52
HVM	High Volume Manufacturing 20, 37, 40, 42, 46
IBO	Image Based Overlay 30, 31, 34–36, 40, 46, 65, 88, 104, 110, 134, 138
ICP	Iterative Closest Point 78–80

IDM	De l'anglais <i>Integrated Device Manufacturer</i> , ces entreprises comme STMicroelectronics conçoivent, fabriquent et vendent des circuits intégrés. 173
iHOPC	intra-field High Order Process Control 26, 118, 119, 122–124
ITRS	International Technology Roadmap For Semiconductor 1, 9
Layout	Terme anglais désignant la disposition physique des éléments d'une puce. 8, 16, 19, 56, 57, 61, 71–73, 77, 86, 172
LCDU	Local CD Uniformity 18, 19
LER	Line Edge Roughness 18
Lithographie	Étape cruciale du procédé de fabrication de puces. Consiste au transfert de motifs d'un masque sur la plaque de silicium via une exposition aux UV. 12–15, 23, 24, 28, 39, 54, 55, 111, 129, 174–176
LOVU	Local OVL Uniformity 19
LWR	Line Width Roughness 18, 19
Mask shop	Fabricant de masque pour la lithographie. 12
Matching	Correspondance entre deux scanners de lithographie. 24
MEB	Microscope Électronique à Balayage 11, 50, 51, 53, 55, 57, 59, 61, 63
MOS	Metal Oxide Semiconductor 5, 7
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor 7
MtM	More-than-More 1
N7	Nœud technologique dit 7 nanomètres 6
NAND	Porte logique réalisant l'opération NON - ET 8
NOSO	Zone active d'un substrat SOI où l'oxyde enterré a été retiré afin d'accéder directement au substrat de silicium. De l'anglais <i>NO SOI</i> 10, 11, 38, 116
NRE	Net Residual Error 65, 90, 96, 98, 103, 105, 114, 117, 118, 121, 138

NZO	Non-Zero Offset 28, 35–38, 45–48, 73, 76, 98, 104, 105, 108, 116, 121, 122, 128, 131, 132, 137, 139–141, 144, 145, 150, 152
OPC	Correction Optique de Proximité 13, 14, 31, 45, 66, 111, 151
OPO	On-Product Overlay 28, 31, 35, 40, 45–48, 68, 70, 71, 73, 76, 104–106, 108, 116, 121, 122, 125, 128, 132, 137–141, 143–145, 150, 152
Overlay	De l'anglais <i>Overlay Control</i> signifiant contrôle de la superposition. Ce vecteur à deux dimensions correspond à la mesure de l'erreur d'alignement entre deux couches réalisée par lithographie. L'OVL a une dimension globale et concerne les alignements à l'échelle de la plaque, du champs d'exposition ou encore de la puce. 1–3, 5, 9, 11, 12, 15–19, 21, 23–30, 32–49, 58, 63–69, 73, 76, 81–85, 87–106, 108–125, 128, 129, 131–141, 143–152, 164, 165, 175, 176
OVL	Overlay 1, 9, 12, 16, 17, 19, 22, 24, 25, 28–30, 32–34, 38–43, 45, 46, 63, 65, 66, 69, 77, 80–84, 90–92, 94, 96, 101, 102, 108, 115, 116, 121, 122, 129, 130, 132, 133, 135, 136, 145, 175, 176
PA	Process Assumptions 20
Patterning	De l'anglais <i>pattern</i> pour motif, terme couramment utilisé pour désigner les étapes de transfert de motifs du masque vers le substrat (ensemble lithographie et gravure). 13, 15
PCDU	Pattern CD Uniformity 19
Pitch	Terme anglais désignant le pas entre deux motifs transférés sur la résine. 1, 14, 15, 31, 129
R2R	Run To Run 22, 26
Rastérisation	Procédé qui consiste à convertir une image vectorielle en une image matricielle. 57, 77

Recalage	Processus ayant pour but d'estimer la transformation rigide qui aligne un nuage de points appelé source sur un nuage de points appelé cible. 67
Recuit	Cycle de chauffage et de refroidissement contrôlé d'un matériau afin d'en modifier les propriétés physiques et électriques. 12, 19, 24
Registration	Mesure de la qualité de l'alignement entre deux masques de lithographie. 24
RET	Resolution Enhancement Team 14
RMS	Root Mean Square 65, 81–84, 87, 88, 90, 102, 105
SCOL	Scatterometry Overlay 34
SE	Secondary Electrons 39, 52, 53, 55, 63, 64, 68, 135
Seed	Pré-contour approximatif utilisé pour le placement de jauge lors du processus d'extraction de contours. 56–58, 69
SEM	Scanning Electron Microscope 5, 11–13, 15, 18, 29, 38–40, 42–47, 49–68, 70, 71, 76, 77, 80, 81, 83–97, 99, 101, 102, 104–106, 108, 109, 111–117, 119, 121–141, 143–148, 150–152, 166, 167, 172, 173, 176, 177
SEM-OVL	Scanning Electron Microscope-Overlay 9, 38, 39, 42, 45–47, 63, 76, 108, 129, 139, 141, 143, 145, 151, 152
SIMPL	Logiciel d'extraction de contour à partir d'image SEM développée par Aselta Nanographics. 47
SOI	Silicium sur Isolant, de l'anglais <i>Silicon On Insulator</i> 5, 9–11, 13, 174
SPC	Statistical Process Control 22, 23
SRAM	Static Random Access Memory 12, 35, 76, 79, 80, 92–96, 98–100, 102–105, 108, 118, 132–135, 137–141, 146
STI	Tranchées d'isolation 10, 11, 13, 32
TDDB	Time-dependent Dielectric Breakdown 17
TEM	Microscope Électronique à Transmission 8, 19, 92, 133, 151
TIS	Tool Induced Shift 21, 22, 33, 35, 65, 98, 99, 148
TMU	Tool Measurement Uncertainty 22, 33–35, 37, 148

TTL	Through The Lens 23
UV	Ultraviolets 12, 174
VC-SEM	Voltage-Contrast Scanning Electron Microscope 43, 44
VIA	Vertical Interconnection Access 8, 16, 18, 42, 43, 129, 147–151, 172