



HAL
open science

Développement de méthodes génériques de corrélation entre les mesures électriques & physiques des composants et les étapes élémentaires de fabrication

Cyril Alegret

► **To cite this version:**

Cyril Alegret. Développement de méthodes génériques de corrélation entre les mesures électriques & physiques des composants et les étapes élémentaires de fabrication. Matière Condensée [cond-mat]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2006. Français. NNT : . tel-00122893

HAL Id: tel-00122893

<https://theses.hal.science/tel-00122893>

Submitted on 5 Jan 2009

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

Présentée par

Cyril ALEGRET

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

JOSEPH FOURIER DE GRENOBLE

Spécialité : Microélectronique

**“Développement de méthodes génériques de
corrélation entre les mesures électriques & physiques
des composants et les étapes élémentaires de
fabrication”**

Thèse soutenue le 30 Novembre 2006

MEMBRES DU JURY :

Président :	AHMAD BSIESY	Professeur UJF, Grenoble
Rapporteurs :	STEPHANE DAUZERE-PERES	Professeur, Ecole des Mines de Saint-Etienne
	PIERRE RANSON	Professeur, Université d'Orléans
Directeur de thèse :	RENE-LOUIS INGLEBERT	Professeur UJF, Grenoble
Examineurs :	SRDJAN KORDIC	Ingénieur de recherche NXP, Crolles
	FRANÇOIS PASQUALINI	Ingénieur ST Microelectronics, Crolles
Invité :	JOOST VAN-HERK	Ingénieur NXP, Crolles

Thèse réalisée dans le cadre d'un accord C.I.F.R.E entre le Laboratoire des Technologies de la Microélectronique (LTM), 17 rue des Martyrs 38054 Grenoble Cedex 09 et de la société ST Microelectronics, 850 rue Jean Monet, 38926 Crolles Cedex

Sommaire

Introduction Générale	10
I- Les enjeux du contrôle des procédés	10
II- Le Contrôle des procédés : état de l'art au début de la thèse	11
II.1- Contrôle Statistique des procédés (SPC)	12
II.2- Fault detection and Classification (FDC)	13
II.3- Run to Run Control (R ² R) – Boucles de régulation	14
II.4- Lien entre les mesures effectuées au sein d'une ligne de production	16
III- Les nouvelles technologies (sub 120nm) : où se situe les limitations en terme de développement et de contrôle des procédés ?	16
III.1- Le manque de cohérence entre les différentes composantes du contrôle des procédés	16
III.2- Les limitations des outils & des méthodes d'analyses de données "traditionnels"	17
III.3- La volonté de réduction des coûts des circuits fabriqués	18
IV- Objectifs de la thèse et présentation du manuscrit	19
IV.1- Problématique	19
IV.2- Premier axe de recherche : développement d'un environnement adéquat et recherche d'outils statistiques novateurs pour l'analyse de données - Application au monde de la microélectronique	19
IV.3- Deuxième axe de recherche : amélioration de la cohérence des méthodes de contrôle	19
IV.4- Plan du manuscrit	19
Bibliographie	21
Chapitre 1 : L'analyse statistique de données : pré requis, Algorithmes & Méthodologie	24
I- Introduction	24
II- Développement d'un environnement adéquat pour la réalisation des analyses de données	25
II.1- La collecte des données et la centralisation des données	26
II.2- Exploration et traitement des données	28
III- Les outils d'analyse de données appliqués au domaine des semi-conducteurs	37
III.1- Les limitations des méthodes et des outils d'analyse "standard" utilisés dans le domaine microélectronique	37
III.2- Les méthodes d'analyse statistiques multivariées type ACP et PLS	38
III.3- Les outils basés sur les algorithmes d'apprentissage	47

IV- Méthodologie de corrélation entre les mesures électriques et physiques et les paramètres des équipements	54
IV.1- Recherche des corrélations entre les données physiques et électriques et les paramètres des équipements – Caractérisation des variances électrique et physique	54
IV.2- Méthodes de réduction de la variabilité des procédés	55
IV.3- Optimisation du plan de contrôle des procédés de fabrication – Contrôle de la variance	56
V- Conclusion	57
Bibliographie	59

Chapitre 2 : Recherche des corrélations entre les mesures électriques et physiques et les paramètres des équipements pour les opérations d'isolation des transistors pour la technologie 90nm _____ **63**

I- Introduction	63
I.1- Contexte d'étude	64
I.2- Intérêt de la modélisation des procédés d'isolation entre les transistors	65
II- Modélisation des interactions entre les procédés de la brique STI	67
II.1- Analyse statistique des corrélations entre les mesures physiques	67
II.2- Validation physique des relations entre les mesures physiques	69
II.3- Impact des variations des procédés du module STI sur les opérations suivantes	74
II.4- Réduction de la variance du Step Height	75
II.5- Vérification de la cohérence des spécifications appliquées à chacune des étapes de procédé	78
III- Modélisation de l'influence des variations des mesures physiques du module STI sur les principales caractéristiques électriques	79
III.1- Analyse statistique des corrélations entre les mesures physiques et électriques du module STI	80
III.2- Validation physique des relations entre les mesures physiques et électriques	82
III.3- Apport des analyses - Impact des solutions de réduction de variabilité sur les mesures électriques	89
IV- Modélisation des étapes élémentaires de la brique de procédés STI	90
IV.1- Modélisation du comportement des procédés d'oxydation rapide - Rapid Thermal Oxidation (RTO)	91
IV.2- Modélisation du comportement du procédé de gravure des tranchées d'isolation	95
IV.3- Modélisation du du procédé de Dépôt Chimique en phase Vapeur - CVD	97
IV.4- Modélisation du comportement des procédés de polissage mécanico-chimique	103
IV.5- Modélisation du comportement du procédé de gravure humide	108
V- Conclusion	110

Chapitre 3 : Modélisation des comportements physiques et électriques des transistors CMOS pour la technologie 90nm _____ **112**

I- Introduction	112
I.1- Le contrôle du transistor : le processus clé de la technologie	115
I.2- Objectifs de la modélisation du comportement des transistors	116
II- Présentation des modélisations entre les mesures physiques et électriques du module grille	117
II.1- Modélisation statistique des interactions entre les opérations de fabrication du module grille	117
II.2- Modélisation multivariée de l'impact des variations des mesures physiques sur les caractéristiques électriques des transistors	119
III- Apport des modélisations établies pour la réduction et le contrôle de la variance des performances des transistors	122
III.1- Apport de la modélisation des interactions entre les opérations de fabrication	122
III.2- Réduction de la variabilité des caractéristiques électriques des transistors – Diminution de la dispersion des courants de saturations	122
III.3- Optimisation du contrôle des performances électriques des transistors	127
IV- Modélisation du comportement des étapes élémentaires du module grille	129
IV.1- Modélisation du comportement des procédés d'oxydation thermique - Rapid Thermal Oxydation	129
IV.2- Modélisation du comportement des procédés de dépôt du polysilicium à haute température	132
IV.3- Modélisation du comportement du procédé de gravure de la grille en polysilicium	135
IV.4- Modélisation du comportement des procédés de déposition du TEOS à haute température	139
IV.5- Modélisation du comportement des procédés de déposition du nitrure à haute température	139
IV.6- Modélisation du comportement du procédé de gravure Offset	142
IV.7- Modélisation du comportement du procédé de gravure des espaceurs – gravure spacer	145
V- Conclusion	148

Chapitre 4 : Recherche des liens entre les étapes de fabrication des interconnexions de la technologie 90nm _____ **151**

I- Introduction	151
I.1- Contexte d'étude	152
I.2- Objectifs de la modélisation de la variabilité induite par les étapes de fabrication des interconnexions – Amélioration de la variance de la conductivité des interconnexions	153
II- Modélisation des interactions entre les opérations de fabrication des interconnexions et analyse de la source de variance des mesures électriques du module métal 2	153
II.1- Modélisation statistique des relations entre les mesures physiques	154
II.2- Présentation des relations statistiques modélisant l'impact de la variabilité des procédés sur les caractéristiques électriques des interconnexions	155

III- Modélisation des étapes élémentaires employées pour la réalisation des interconnexions	156
III.1- Modélisation du comportement du procédé de dépôt SiCN	157
III.2- Modélisation du comportement du procédé de dépôt SiOC	158
III.3- Modélisation du comportement du procédé de gravure du masque dur en TiN	159
III.4- Modélisation du comportement du procédé de gravure des via	161
III.5- Modélisation du comportement du procédé de gravure des lignes	162
III.6- Modélisation du comportement du procédé de polissage mécanico-chimique	163
IV- Apports des analyses de modélisation	165
IV.1- Proposition de réduction de la variabilité des mesures de résistances des lignes de métal	166
IV.2- Vérification de la cohérence entre les spécifications des mesures électriques et physiques du module d'interconnexion métal 2	169
V- Conclusion	170
<i>Bibliographie des chapitres 2, 3 et 4</i>	<i>172</i>
<i>Conclusion générale</i>	<i>177</i>
<i>Table des figures</i>	<i>182</i>
<i>Table des tableaux</i>	<i>187</i>
<i>Annexes</i>	<i>188</i>

Listes des sigles et des abréviations

Contrôle des procédés et analyse de données

- APC : Advanced Process Control – Méthode globale de contrôle des procédés de fabrication. L'APC est constitué du SPC, de la FDC, du R²R.
- SPC : Statistical Process Control – Contrôle statistique des mesures physiques effectuées après les procédés de fabrication et des mesures électriques.
- FDC : Fault Detection and Classification – Contrôle statistique des paramètres des équipements de fabrication.
- R²R : Run to run – Boucle de régulation permettant d'ajuster "en temps réel" certains paramètres des procédés pour diminuer leur variabilité.
- PT : Parametric Test – Tests électriques effectués sur des structures des tests en fin de gamme de fabrication des circuits.
- EWS : Electrical Wafer Sort – Tests électriques effectués sur les circuits en fin de gamme de fabrication des circuits.
- C_{pm} : Indicateur statistique définissant la capacité d'un équipement de mesure (physique ou électrique) à "bien" mesurer.
- C_{pk} : Indicateur statistique caractérisant le centrage ainsi que la dispersion d'un ensemble de mesures par rapport à des limites de spécification.
- RBF : Radial Basis Functions (somme pondérées de translations de fonctions symétriques augmentées d'un polynôme de degré k).
- PCA : Principal Component Analysis – Analyse statistique décrivant les corrélations entre des variables explicatives.
- PLS : Partial Least Square – Analyse statistique décrivant les corrélations entre des variables à expliquer et des variables explicatives.

Mesures électriques / Tests paramétriques

Dans ce manuscrit, nous garderons la nomenclature utilisée sur le site de Crolles concernant la dénomination des mesures électriques. Les lignes ci-dessous ont pour objectif d'explicitier la dénomination de chacune des mesures électriques rencontrées.

Remarque : Les structures des tests électriques peuvent être siliçurées (siliçuration à base de CoSi₂ entre les structures de tests et les niveaux de métal) ou non siliçurées. Une mesure électrique comprenant la terminaison "_UN" signifie que la structure est non siliçurée. Dans le cas contraire celle-ci est siliçurée.

BV_{xWyWz} : Breakout Voltage – Tension de calquage entre des caissons dopés x (N ou P) et y (N ou P) et de dimension z. Cette structure caractérise l'isolation latérale entre 2 zones actives voisines.

CDM220D : Critical Dimension Metal 2 – Largeur électrique de la ligne de métal de la structure "RSM220D".

CIMD11 : Capacité entre les lignes de cuivres des niveaux d'interconnexions métal 1 et 2.

CDPP_UN : Critical Dimension Poly P-doped – Dimension électrique de la grille polysilicium dopée P.

CSDP_UN : Critical Dimension Source Drain P-doped – Dimension électrique des zones actives dopées P.

INFING : Courant mesuré aux bornes d'une diode N⁺ / P soumise à une tension de 4.5 Volts et située entre deux tranchées d'isolation.

INPOLY : Courant mesuré aux bornes d'une diode N⁺ / P soumise à une tension de 4.5 Volts et située entre lignes de polysilicium.

IPFING : Courant mesuré aux bornes d'une diode P⁺ / N soumise à une tension de 4.5 Volts et située entre deux tranchées d'isolation.

IPPOLY : Courant mesuré aux bornes d'une diode P⁺ / N soumise à une tension de 4.5 Volts et située entre lignes de polysilicium.

RLM2SLD : Resistance Line Metal 2 – Résistance d'une ligne de métal pour le niveau d'interconnexion métal 2.

RSM220D : Resistance Sheet Metal 2 – Résistance mesurée sur un barreau de cuivre de grande section (320µm*0.36µm).

RSNW_{xxx} : Resistance Sheet N Well – Résistance d'un barreau de silicium dope lors de l'implantation des caissons N

RSP_{x3} : Resistance Sheet Poly – Résistance d'un barreau de poly-silicium dopé x (N ou P) de dimension 3µm.

RSSD_{x3} : Resistance Sheet Source Drain – Résistance d'un barreau de silicium dopé x (N ou P) de dimension 3µm en milieu isolé.

RSSD_{x11} : Resistance Sheet Source Drain – Résistance d'un barreau de silicium dopé x (N ou P) de dimension 0.11µm en milieu isolé.

RSSD_{x1114} : Resistance Sheet Source Drain – Résistance d'un barreau de silicium dopé x (N ou P) de dimension 0.11µm en milieu dense (distance entre 2 structures consécutives = 0.14µm).

RV1_{xxxx} : Résistance de chaînes de via (xxxx décrivant le nombre de via dans la structure).

TIMD1 : Epaisseur de diélectrique équivalente entre les lignes de cuivres des niveaux d'interconnexions métal 1 et 2.

TP1NPW : Mesure électrique de l'oxyde de grille entre une grille en polysilicium dopée N et le substrat dopé P.

- TP1PNW : Mesure électrique de l'oxyde de grille entre une grille en polysilicium dopée P et le substrat dopé N.
- xIDLy : Courant de fuite d'un transistor de type x (N ou P) et de dimension y.
- xIDSy : Courant de saturation d'un transistor de type x (N ou P) et de dimension y.
- xVTy : Tension de seuil d'un transistor de type x (N ou P) et de dimension y.

Introduction Générale

I- Les enjeux du contrôle des procédés _____	10
II- Le Contrôle des procédés : état de l'art au début de la thèse ____	11
III- Les nouvelles technologies (sub 120nm) : où se situe les limitations en terme de développement et de contrôle des procédés ? _____	16
IV- Objectifs de la thèse et présentation du manuscrit _____	19
Bibliographie _____	21

Introduction Générale

I- Les enjeux du contrôle des procédés

La demande croissante du marché en circuits intégrés, rapides, économes en énergie est la force motrice de la réduction des dimensions des dispositifs élémentaires de la microélectronique. La réduction des dimensions du transistor répond du reste à une loi empirique définissant que la longueur caractéristique du transistor MOS est réduite de 70% tous les 3 ans. Cette course à l'intégration et à la production de ces circuits sélectionne les industries capables de tenir ce défi permanent. L'élaboration de ces dispositifs comporte trois grandes étapes :

- La conception de la structure des dispositifs à élaborer.
- Le développement des procédés permettant de construire couche après couche la structure des dispositifs précédemment définis.
- L'industrialisation et la mise sous contrôle de ces procédés.

Dans ce manuscrit, nous nous intéressons uniquement à cette dernière étape et plus particulièrement aux méthodes de contrôle des procédés de fabrication.

De nos jours, de par la complexité des structures élaborées (Largeurs de grille actuelles des dispositifs de 90nm et programmes de développement 65nm et 45nm), le contrôle des procédés devient un secteur primordial du fonctionnement d'une usine de semi-conducteur [BEINGLASS 2002]. Ainsi :

- *La recherche et la compréhension des sources de variabilité* deviennent des étapes importantes et sont aujourd'hui très coûteuses en terme de temps et de personnes. De plus, les variations des paramètres physiques et/ou électriques sont de plus en plus faibles à chaque changement de technologie et par conséquent plus difficile à caractériser. Dans ce contexte, la notion d'analyse de données prend toute son importance et des outils d'analyses de plus en plus performants sont nécessaires pour comprendre les sources de variabilité des procédés [AIRIKKA 2004].
- *Le contrôle de la variabilité des procédés* est devenu une étape prédominante permettant de garantir la qualité des produits fabriqués. Le développement de technologies de plus en plus agressives nécessite la mise en place de contrôles très précis des équipements. Les procédés devenant de plus en plus critiques, une dérive autrefois considérée comme négligeable peut avoir, de nos jours, une réelle influence sur la qualité du produit. Pour atteindre un haut degré de contrôle de l'équipement, il a fallu s'appuyer sur un concept rigoureux et adaptable dans un contexte industriel : ce concept est appelé l'Advanced Equipment Control / Advanced Process Control (AEC/APC) [FIORLETTA 2004] [LYMBEROPOULOS 2004].

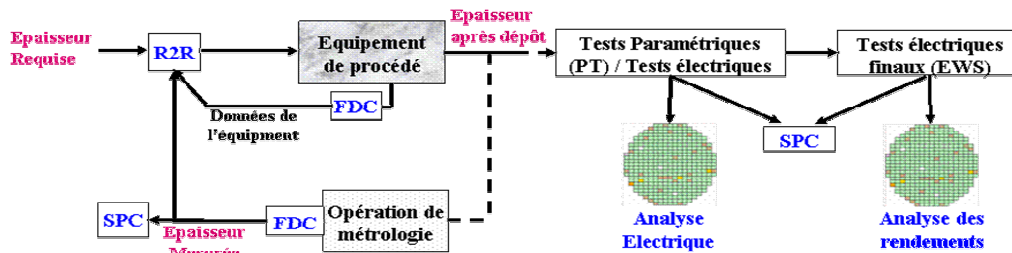
Dans ce contexte, l'alliance Crolles 2¹ a besoin de développer des méthodes d'analyses novatrices afin de mieux maîtriser la variance des procédés et ainsi garantir un rendement optimal et une meilleure fiabilité des circuits élaborés. Ceci, en réduisant les temps de cycle d'apprentissage et de production au minimum.

Guidé par ce concept, ce projet de recherche consiste à mettre en œuvre une méthodologie globale de corrélation entre les mesures électriques et physiques effectuées sur les plaques de production et les variations des paramètres des équipements collectés lors des opérations de fabrication. Ces travaux visent tout d'abord à mieux comprendre l'origine des sources de variations des procédés de fabrication afin de les réduire. Dans un second temps, les méthodes proposées permettront d'optimiser le contrôle de la variabilité des procédés de fabrication.

La première partie de cette introduction sera consacrée à la description des principales composantes du contrôle des procédés. Ensuite, nous présenterons les enjeux ainsi que les limites des méthodes employées au début de cette thèse pour la caractérisation, la réduction et le contrôle de la variabilité des procédés. Finalement, nous exposerons les deux axes d'études suivis lors de ces travaux.

II- Le Contrôle des procédés : état de l'art au début de la thèse

Si on souhaite obtenir des performances électriques stables des circuits, il faut obligatoirement avoir des performances des procédés stables. Cela passe par une mise sous contrôle très fine des équipements et de l'intégration des circuits ayant pour but d'appréhender complètement (de manière globale mais aussi très précise) le comportement des machines et des circuits électriques. Pour cela, plusieurs types de contrôle (SPC et FDC) sont réalisés au sein de la ligne de production (Figure 1).



- **SPC** : Contrôle statistique de la performance des procédés.
- **FDC** : Contrôle des paramètres de l'équipement.
- **R2R** : Ajustement des recettes pour améliorer la performance des procédés.
- **PT** : Tests électriques effectués sur des structures de test.

Figure 1. Opérations de contrôle effectuées au sein de la ligne de production
(exemple d'un procédé de Dépôt Chimique en phase Vapeur - CVD).

La variance totale de la mesure physique effectuée après l'opération de fabrication est contrôlée par le système SPC. Elle contribue à la variabilité d'une ou plusieurs mesures électriques (PT) et peut impacter le rendement électrique final. Pour chaque étape de fabrication,

¹ Coopération entre 3 fabricants de semi-conducteurs : Freescale, Philips et STMicroelectronics.

la variance totale de la mesure physique associée se décompose en trois composantes [HUBAC 2006]:

- La variance due à l'étape de procédé elle-même σ_p ,
- La variance liée à la précision de la mesure σ_m ,
- Ainsi que la variance induite par les variations des étapes antérieures σ_{ant} .

Les boucles de régulation R²R permettent de réduire la contribution des composantes σ_p et σ_{ant} .

Finalement, le système FDC permet de caractériser la variance liée à l'étape de procédé σ_p elle-même ou bien de détecter une dérive d'un équipement de mesures (contribuant à une augmentation de la variance due à la mesure σ_m).

Les paragraphes suivants proposent une description détaillée des principales composantes du contrôle des procédés.

II.1- Contrôle Statistique des procédés (SPC)

Le Contrôle Statistique des Procédés consiste à contrôler, grâce à des indicateurs statistiques, les performances du procédé. C'est un outil indispensable pour réaliser un pilotage rationnel du procédé de fabrication [MONTGOMERY 2001], [PILLET 2001]. De nos jours, il est la base de surveillance de la ligne de production [KOHLI 2002]. En microélectronique, cette méthodologie est appliquée à 3 types de mesures :

- Les mesures physiques effectuées sur les plaques. Ces mesures sont réalisées lors des opérations dites de métrologie. Elles sont effectuées après certains procédés jugés critiques (dépôts de matériaux, gravures, ...) et permettent de contrôler, à posteriori, le bon déroulement de ces opérations de fabrication. Nous appellerons "SPC métrologie" ce type de contrôle.

Sur le site de Crolles 2, ces mesures ne sont pas réalisées sur les dispositifs mais dans les zones de découpes. Deux plaques par lots² sont généralement contrôlées. En fonction de la complexité et la durée de la mesure, les mesures sont effectuées sur 17 ou sur 9 zones³ de la plaque.

- Les mesures électriques effectuées à la fin de la gamme de fabrication du transistor ainsi qu'à la suite des opérations de fabrication des interconnexions. Elles sont réalisées sur chacune des plaques du lot sur des structures de tests. Elles permettent d'identifier, le cas échéant, les groupes d'opérations pouvant être défectueux. A Crolles 2, les mesures électriques sont enregistrées en 9⁴ zones de la plaque. Nous utiliserons le terme "SPC PT" pour désigner ce type de contrôle.

² Un lot est un ensemble comportant généralement 25 plaques.

³ Les 9 sites de mesures étant un sous ensemble des 17 points originels.

⁴ Sur le site de Crolles 2 et en phase de production, les 9 sites de mesures électriques sont identiques aux 9 sites de métrologie.

- Les tests finaux appelés EWS (Electrical Wafer Sort) sont appliqués systématiquement à la fin des opérations de fabrication sur chacun des circuits intégrés. Ils garantissent aux clients la qualité des circuits livrés.

Dans la suite de ce manuscrit nous nous intéresserons principalement aux mesures réalisées à la suite des opérations de métrologie et des tests électriques PT. Les tests EWS ne seront ainsi pas pris en compte mais la méthodologie développée peut être étendue à ce type de mesures.

Deux types de limites sont associés aux variables physiques et électriques précédemment décrites :

- Les limites de spécifications sont les limites à ne pas franchir, sous peine d'obtenir un dysfonctionnement du circuit. Ses limites sont appliquées à chaque valeur individuelle mesurée (9 ou 17 valeurs par plaque). Elles garantissent le bon fonctionnement *des circuits*.
- Les limites de contrôles sont les barrières qualifiant le bon fonctionnement d'une *opération de fabrication*. Ses limites sont appliquées sur des indicateurs statistiques (de type moyenne ou écart type) calculés à partir des valeurs individuelles mesurées (généralement 3 indicateurs par lot).

Les contrôles SPC métrologie et SPC PT sont d'autant plus fiables que la variance due à la mesure σ_m , est faible. Cette condition requiert par conséquent une optimisation des recettes de mesures et un excellent alignement du comportement de chacun des équipements de métrologie.

II.2- Fault detection and Classification (FDC)

Les méthodes de contrôle traditionnelles des procédés ne peuvent souvent être réalisées qu'à l'aide de mesures effectuées **après** le traitement des plaques (ex. : SPC) : ceci impacte évidemment les temps de cycles de R&D et de fabrication (coût de temps et d'argent). Le concept de FDC permet de suivre en temps réel (contrôle plaque a plaque des procédés), l'évolution des variables des équipements (ou variables FDC) et ainsi de détecter rapidement une anomalie de fonctionnement de la machine.

L'objectif de cette approche est de mieux maîtriser les dérives des équipements de fabrication [SCANLAN 2003]. Les outils FDC utilisent des systèmes d'analyses univariées et multivariées (voir chapitre 1 paragraphe III.2). L'outil industriel de collection et d'analyse des données en temps réel choisi sur le site de Crolles est la solution "Maestria"⁵. Cet outil permet, à partir des données temporelles collectées durant le procédé, de créer des indicateurs statistiques pour chacune des variables choisies de l'équipement. De 1 à 3 niveaux de limites peuvent ensuite être appliqués à ces indicateurs. Ces limites sont calculées statistiquement [MONTGOMERY 2001] ou, plus finement, à partir de modélisations mathématiques [BUCLON 2005].

⁵ Solution proposée par la société SiAutomation

La Figure 2-a ci-dessous présente l'évolution temporelle de la tension d'autopolarisation de la plaque durant un procédé de gravure sèche. La Figure 2-b représente l'évolution univariée de la moyenne de la tension d'autopolarisation durant l'étape 6 (étape de gravure principale) en fonction du numéro des plaques processées ainsi que les limites de contrôles associées.

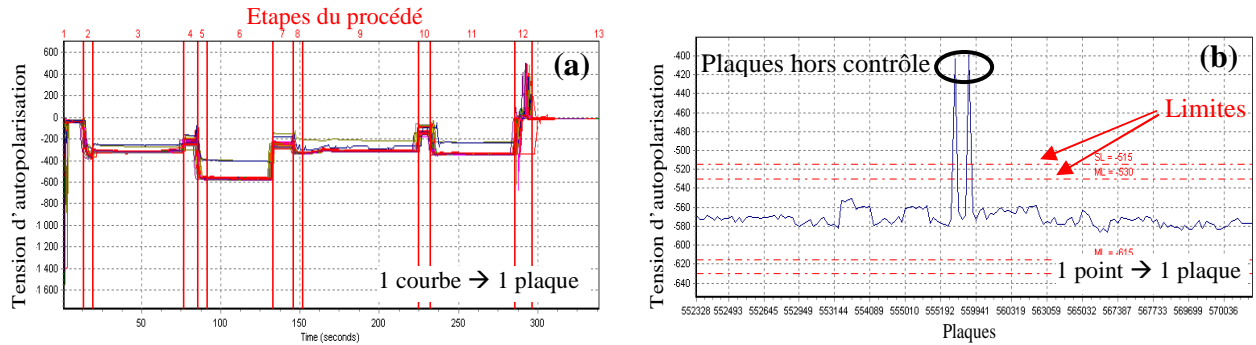


Figure 2. Représentations temporelle (a) et univariée (b) de la tension d'autopolarisation pendant un procédé de gravure sèche.

La surveillance du comportement des variables des équipements de production valide ainsi les conditions de procédé lors de chacune des opérations de fabrication. Les variables des équipements sont regroupées en trois catégories :

- Celles *non* collectées,
- Celles dont les données sont *uniquement* collectées,
- Celles dont les données sont collectées *et* analysées.

Cette approche de contrôle des équipements requiert toutefois une excellente connaissance des équipements afin d'évaluer la pertinence des paramètres FDC à collecter et des limites à appliquer.

On distingue généralement 2 types de paramètres FDC :

- Les paramètres régulés : ces paramètres sont enregistrés et régulés en temps réel par la machine de fabrication. Cette régulation est assurée en modifiant la valeur d'un ou plusieurs paramètres "d'entrée" (dans un équipement de gravure, l'ouverture d'une vanne permet de réguler et de maintenir une pression dans la chambre de procédé). Leur gamme de variation est souvent très faible.
- Les paramètres "d'entrée" : ces paramètres dépendent directement des conditions de procédé. Ils ne sont pas régulés par l'équipement.

II.3- Run to Run Control (R²R) – Boucles de régulation

L'objectif des boucles de régulation est de garantir la stabilité des processus de fabrication tout au long de la vie de l'équipement [MOYNE 2001].

Chaque étape de procédé induit une certaine variabilité au niveau des plaques. Cette variabilité peut être traduite par des variations entre les lots de production σ_{lot} , entre les plaques d'un même lot σ_{plaque} et / ou entre les mesures à l'intérieur d'une même plaque σ_{site} . L'objectif des boucles de régulation est de diminuer cette variabilité. Ce concept se base sur la modification de

certaines paramètres des recettes⁶ de production en fonction des mesures effectuées sur les plaques et des conditions expérimentales lors des procédés. On distingue deux types de boucles de régulations :

- Les boucles de régulations de type "Feed Back" sont réalisées au niveau d'un même équipement. A partir d'un modèle prédéfini, l'écart entre la valeur cible et la valeur mesurée au niveau de plaques d'un lot N permet de calculer la correction des paramètres de la machine à effectuer pour que les plaques du lot N+1 atteignent cette valeur cible. La Figure 3 décrit l'exemple d'une telle boucle pour une étape de photolithographie. En fonction des mesures CD obtenues pour le lot N, une correction de dose est appliquée au lot suivant pour obtenir une valeur plus proche de la valeur cible.

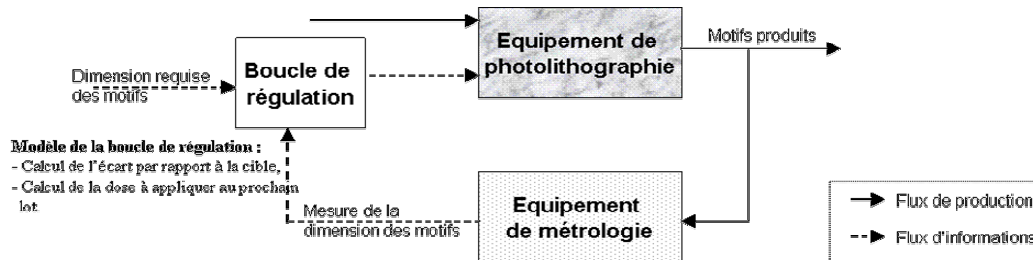


Figure 3. Principe de la régulation de type "Feedback" appliquée en photolithographie.

- Les boucles de régulation de type "Feed Forward" sont utilisées au niveau des lots. Ce type de boucle a pour objectif de diminuer la variabilité observée à une étape N en modifiant les paramètres de la recette de l'opération N+1. La Figure 4 décrit un exemple de boucle de régulation appliquée à l'étape de polissage mécano-chimique (CMP). En fonction des résultats des mesures après le procédé de dépôt chimique en phase vapeur (CVD), un ajustement des paramètres de la recette de CMP (temps de polissage) est effectué.

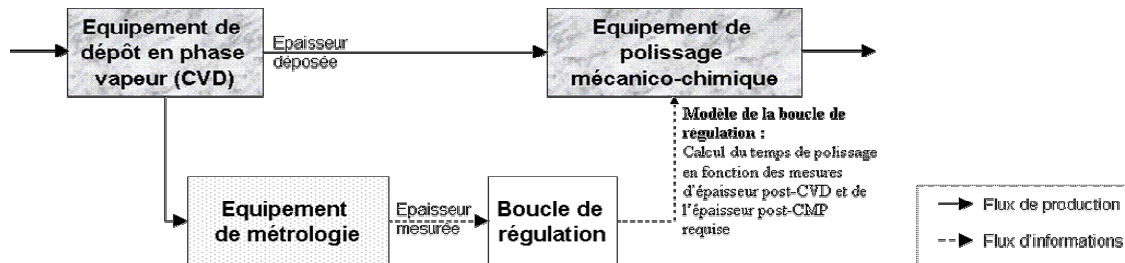


Figure 4. Principe de la régulation de type "Feed forward" appliquée en CVD-CMP.

Ce contrôle, destiné à améliorer la stabilité des rendements, a déjà fait ses preuves pour les opérations de production telles que la CMP [HUANG 2004], la CVD, la photolithographie ou la gravure [TOPRAC 1999]. Toutefois, avant d'implémenter de telles boucles, il est nécessaire d'en justifier l'apport en terme de réduction de la variance. Nous verrons dans la suite de ce manuscrit comment l'analyse des données des mesures réalisées en production permet de définir les futures boucles de régulations à mettre en place.

⁶ Fichier présent sur chaque équipement comportant les consignes des différents paramètres du procédé (Pression, Flux des gaz, puissance RF).

II.4- Lien entre les mesures effectuées au sein d'une ligne de production

Les différents niveaux de surveillance (SPC et FDC) permettent une détection des dérives des procédés de fabrication. L'utilisation adaptée de ces moyens de surveillance est cependant conditionnée par la connaissance des relations entre les différentes mesures physiques et électriques.

La variabilité des mesures électriques peut s'expliquer de plusieurs façons :

- L'enchaînement des opérations utilise au moins une recette de fabrication dont un point de fonctionnement dévie par rapport au point de fonctionnement spécifié. Cette dérive est traduite par une augmentation de la variabilité de la mesure physique correspondante,
- Une contamination particulière importante causant une dégradation des performances des circuits électriques.

Les études menées dans le milieu de la microélectronique montrent qu'au début de la phase d'industrialisation d'une technologie, la principale source de variance des mesures électriques provient de la variabilité des procédés de fabrication [BERGLUND 1999]. Par conséquent, les travaux présentés seront principalement focalisés sur l'analyse de la variance des procédés de fabrication. Le plus souvent, cette variabilité est reliée à des dérives de procédés ; Ces dérives pouvant être caractérisées par un ou plusieurs paramètres de l'équipement collectés pendant l'étape de fabrication.

III- Les nouvelles technologies (sub 120nm) : où se situe les limitations en terme de développement et de contrôle des procédés ?

Dans le paragraphe précédent, nous avons mis en évidence les relations de cause à effet existantes entre les différents éléments du contrôle des procédés. Cependant, la quantification de ces liens n'est pas toujours réalisée de façon globale.

III.1- Le manque de cohérence entre les différentes composantes du contrôle des procédés

Premièrement, chacun des contrôles (SPC et FDC) est effectué indépendamment des autres malgré les relations existantes précédemment décrites [EDGAR 2000]. Par exemple, chacune des limites de spécifications appliquées aux mesures physiques, électriques ainsi qu'aux paramètres FDC est aujourd'hui fixée de façon indépendante sans tenir compte de l'ensemble des corrélations existantes entre ces mesures. Ainsi, une mesure physique contrôlée par des limites trop resserrées peut être détectée hors spécification sans entraîner une mesure hors spécification lors des tests électriques.

Du point de vue de l'équipement, la connaissance limitée des équipements fait qu'une mesure hors spécification en métrologie n'est pas à chaque fois détectée par les paramètres équipements. Cette non détection lors du procédé peut provenir de deux phénomènes :

- Soit les limites appliquées aux indicateurs FDC et aux mesures physiques ne sont pas cohérentes,

- Soit aucune des variables de l'équipement collectées durant le procédé n'est assez pertinente pour détecter ce genre d'anomalie.

Deuxièmement, la mise en place de boucles de régulation au niveau d'une étape de procédé N est généralement réalisée sans avoir caractérisé au préalable [BOTHE 2004] :

- D'où provient la variance du procédé (variance due à l'opération de fabrication N elle-même ou influence d'une étape antérieure),
- La nature de la variance (variation inter-lot, inter-plaque ou intra-plaque),
- L'impact de cette variabilité sur les performances électriques des circuits.

Finalement, l'implémentation de telles boucles d'asservissement implique des variations délibérées au niveau des paramètres des machines et par conséquent impacte les contrôles SPC et FDC. Du point de vue FDC on distingue :

- Les paramètres machines directement affectés par les boucles de régulations. Par exemple, lors d'une régulation de type "Feed Forward" au niveau d'un procédé de CMP, on peut être amené à modifier la pression à appliquer à chacune des têtes de polissage.
- Les paramètres machines indirectement affectés par les boucles de régulations. Par exemple, le niveau d'intensité des raies optiques collectées lors d'un procédé de gravure sèche sera influencé par un ajustement du temps de la gravure.

Généralement, les paramètres collectés par le système FDC ainsi que les limites associées ne sont pas remis en cause lors de la mise en place d'une boucle de régulation R²R. Néanmoins, un ajustement destiné à réduire la variabilité du procédé ne doit pas être perçu comme une dérive par le contrôle FDC.

En conclusion, il est nécessaire de mettre en place de nouvelles approches afin d'améliorer la cohérence entre les méthodes de contrôle effectuées lors de la fabrication des circuits.

III.2- Les limitations des outils & des méthodes d'analyses de données "traditionnels"

Dans les paragraphes suivants, nous montrerons qu'au début de la cette thèse, les principaux outils présents sur le site de Crolles 2 n'avaient pas toutes les caractéristiques adéquates pour la réalisation d'analyses dans le milieu industriel [ALEGRET 2004].

Les principales lacunes de ces outils en terme *d'analyse* sont :

- L'impossibilité de traiter des tableaux de données présentant des valeurs manquantes. Dans un contexte de production, il apparaît souvent que certaines plaques ne soient pas mesurées ou alors que certaines valeurs individuelles mesurées soient aberrantes d'un point de vue physique. Dans ces deux cas, la majorité des outils suppriment entièrement toutes les informations relatives à ces plaques. Cette suppression engendre une perte d'information considérable lors de l'analyse,

- Le manque de pertinence des résultats lorsque le nombre de variables devient très important devant le nombre de plaques. En effet, lors des analyses de données classiques, il est nécessaire d'avoir au moins autant de plaques que de variables à étudier. Dans le milieu semi-conducteur, beaucoup de paramètres physiques et/ou électriques sont étudiés avec souvent peu d'observations,
- La non prise en compte des corrélations entre les variables. Les analyses classiques disponibles traitent en effet chacune des variables indépendamment les unes des autres alors que dans un contexte de production, bon nombre de ces variables sont corrélées entre elles.
- Plus spécifiquement pour les analyses prédictives, les outils standard utilisent des lois polynomiales ne permettant pas de modéliser correctement des phénomènes non linéaires⁷, fréquents dans le domaine microélectronique. Nous verrons par la suite que des outils basés sur les réseaux de neurones peuvent modéliser de tels comportements.

III.3- La volonté de réduction des coûts des circuits fabriqués

Lors des phases de développement et d'industrialisation d'une technologie, de nombreux plans d'expériences sont réalisés afin d'optimiser chacun des procédés de fabrication. Cependant, la construction de ces plans est souvent réalisée de façon grossière et sans tenir compte des résultats des expériences antérieures et surtout des mesures effectuées sur les plaques de production. Nous verrons dans la suite de ce manuscrit comment l'analyse des mesures sur les plaques de production, contenant déjà une grande variabilité intrinsèque, permet de modéliser les corrélations entre les mesures et aider à cibler les paramètres prépondérants ainsi que leur gamme de variations pour les futurs plans d'expériences.

Lors de la phase industrielle, une grande partie des coûts de fabrication d'une ligne de production de semi-conducteurs est liée au temps de cycle de fabrication des circuits. Ainsi, plus ce temps est long, plus les coûts de production seront élevés. Le temps de cycle dépend essentiellement :

- Du temps entre deux étapes consécutives,
- De la durée des procédés de fabrication,
- Et de la durée des mesures physiques et électriques utilisées pour le contrôle SPC.

L'implémentation des contrôles FDC au niveau des équipements peut permettre d'alléger le nombre de mesures réalisées après les procédés et ainsi améliorer les temps de cycle de fabrication. Cependant, cette substitution des mesures physiques et électriques n'est possible seulement si les paramètres contrôlés par le système FDC sont suffisamment pertinents pour détecter l'ensemble des dérives de l'équipement ayant une influence notable sur la fonctionnalité des circuits intégrés fabriqués.

⁷ Une fonction est dite non linéaire lorsque sa dérivée première est dépendante des facteurs de dérivation.

IV- Objectifs de la thèse et présentation du manuscrit

IV.1- Problématique

La problématique générale de ce manuscrit consiste à proposer une méthodologie générale, basée sur l'analyse statistique des corrélations entre les mesures physiques, électriques et les paramètres des équipements, permettant de caractériser et d'optimiser le lien entre toutes les composantes du contrôle des procédés (SPC, FDC et R²R). L'objectif est de développer une méthodologie visant à améliorer la stabilité des procédés ainsi que leur contrôle.

IV.2- Premier axe de recherche : développement d'un environnement adéquat et recherche d'outils statistiques novateurs pour l'analyse de données - Application au monde de la microélectronique

La première partie de ces travaux consiste à réaliser un statut détaillé des outils de contrôle et d'analyse ainsi que des infrastructures déjà en place afin d'identifier les manques éventuels. Cette première phase permettra dans un deuxième temps de définir un environnement "adéquat" pour l'analyse des données et le contrôle des équipements.

IV.3- Deuxième axe de recherche : amélioration de la cohérence des méthodes de contrôle

Comme nous l'avons vu précédemment, les différents types de contrôles sont effectués indépendamment les uns des autres en fonction du besoin de chaque secteur. Aujourd'hui, de par la complexité des processus, il reste délicat d'établir une réelle cohérence entre les différents types de suivis réalisés (SPC, FDC, R²R, PT, EWS).

Dans la suite de ce manuscrit, nous montrerons comment les analyses de corrélation entre les mesures physiques et électriques peuvent permettre de proposer des actions de réduction de la variabilité des performances des circuits. Nous démontrerons également comment l'analyse des corrélations entre les données de métrologie et les variables des équipements permet de définir les variables pertinentes à surveiller durant les procédés.

IV.4- Plan du manuscrit

Le chapitre 1 de ce manuscrit se focalisera sur les pré-requis nécessaires pour effectuer des analyses de données. La première partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation des caractéristiques principales d'un environnement adéquat pour la réalisation des analyses en abordant les notions de collecte, de stockage et d'accès aux données. Pour les usines 300mm, les variations intra-plaque étant la principale source de variance des mesures physiques et électriques, de nouveaux concepts de modélisation de surface seront ensuite proposés, permettant de réaliser des analyses au niveau des sites de mesures.

Dans la seconde partie de ce premier chapitre nous aborderons les notions de prétraitement des données et détaillerons les différentes méthodes d'analyses statistiques descriptives et prédictives couramment employées par les statisticiens. Ceci nous permettra

d'établir un état des lieux précis des outils présents sur le site de Crolles2 et plus généralement dans le domaine de la microélectronique. Cet état des lieux débouchera, en fonction des problématiques d'analyses de données identifiées pour le site de Crolles2, sur un état des lacunes existantes en terme d'outils et de méthodes analyse de données. Nous montrerons ensuite comment les analyses multivariées et neuronales permettent de combler ces manques. Leurs avantages et inconvénients ainsi que leur apport par rapport aux outils standard seront présentés. Basée sur ces outils, la méthodologie de caractérisation, de réduction et de contrôle de la variabilité sera finalement présentée.

Les chapitres 2, 3 et 4 démontreront l'apport des analyses multivariées et neuronales pour la modélisation de comportements physiques. Nous étudierons en particulier les opérations de fabrication utilisées pour l'élaboration de l'isolation entre les transistors, le fonctionnement du transistor et un niveau d'interconnexions pour la technologie 90nm⁸. Pour chaque cas d'étude les résultats des analyses de corrélations seront présentés entre :

- Les résultats des opérations de métrologie elles mêmes,
- Les mesures électriques et les mesures physiques,
- Les paramètres des équipements et les mesures physiques.

Chacune de ces modélisations caractérisera la nature et la source de la variance des mesures électriques et physiques. En fonction des problématiques rencontrées cela permettra :

- De proposer des actions correctrices pour diminuer la variabilité des procédés définis comme étant les plus critiques. Ces actions sont l'optimisation du procédé à l'aide des plans d'expériences et de l'implémentation de boucles de régulation R²R,
- De vérifier la cohérence entre les limites de spécifications associées aux contrôles SPC métrologie et PT. Les spécifications statistiques proposées prendront également en compte l'ensemble des interactions entre les paramètres,
- De proposer les limites à appliquer aux paramètres pertinents contrôlés par le système FDC.

Le chapitre 2 détaille très précisément l'application de la méthode développée aux problématiques de contrôle des opérations de fabrication du module STI. Dans les chapitres 3 et 4, pour garantir la clarté du manuscrit, seuls les principaux résultats de modélisation et leurs apports sont présentés. Le détail des résultats est toutefois présenté en annexe.

La conclusion générale dressera le bilan du travail présenté dans ce manuscrit. L'intérêt des algorithmes et surtout des modélisations effectuées sera présenté. En particulier, nous montrerons l'apport de ces modélisations pour la caractérisation, la réduction et le contrôle de la variabilité des procédés de fabrication.

⁸ Dimensions des dispositifs pour la technologie 90nm : Largeur de la grille = 90nm ; Largeur des zones actives = 115nm ; Epaisseur d'oxyde de grille = 24Å ; Largeur des vias = 135nm

Bibliographie

- [AIRIKKA 2004], AIRIKKA Pasi, Advanced control methods for industrial process control, IEEE computing control Engineering, July 2004
- [ALEGRET 2004], ALEGRET Cyril, Cyril BIHARE, Sylvie DEL-MEDICO, François PASQUALINI, Chamber Matching on a Gate Etch Equipment, 7TH Meeting Of CREMSI Fuveau, Décembre 2004
- [BEINGLASS 2002], BEINGLASS Israel, Meeting the challenges of process module and fab-wide active control for 300mm, 130nm and beyond, Proceedings of SPIE, Vol.4692, p.136-146, 2002
- [BERGLUND 1999], BERGLUND Neil C., Particle Control or process control, Solid State Technology, November 1999
- [BODE 2004], BODE Christopher, Controlling the margins in 300mm manufacturing, Solid State Technology, February 2004
- [BOTHE 2004], BOTHE Matt, No magic wand, Industrial computing, August 2004
- [EDGAR 2000], EDGAR Thomas F., Automatic Control in microelectronics manufacturing : Practices, challenges, and possibilities, Automatica, vol. 36, p.1567-1603, 2000
- [BUCLON 2005], BUCLON Hervé, ALEGRET Cyril, PASQUALINI François, VAN HERK Joost, The right indicator & limit management for Fault Detection and Classification, 7th European AEC/APC Conference 2005 Aix en Provence, March 2006
- [FIORLLETA 2004], Fiorletta Carl, Capabilities and lessons from 10 years of APC success, Solid State Technology, February 2004
- [HUANG 2004], HUANG Andrew, Using APC for Wafer to wafer control in CMP, Solid State Technology, May 2004
- [HUBAC 2006], HUBAC Stéphane, APC in BEoL : An applied APC approach in State of the Art Semiconductor Manufacturing, 7th European AEC/APC Conference, Aix-en-Provence, March 2006
- [KOHLI 2002], KOHLI Hersh, Conversion cost reduction using advanced process control and real-time data analysis with ERP linkage, International Symposium on Electronic Materials and Packaging, 2002
- [LYMBEROPOULOS 2004], LYMBEROPOULOS Dimitris, Advanced Process Control Comes of Age, Semiconductor International, January 2004
- [MONTGOMERY 2001], MONTGOMERY Douglas C., Introduction to Statistical Quality Control, John Wiley & sons, ISBN 0-471-31648-2, 2001
- [MOYNE 2001], MOYNES James, Run-to-Run Control in Semiconductor Manufacturing, CRC Press LLC, ISBN 0-8943-1178-0, 2001
- [NAKAMOTO 2003], NAKAMOTO Masashi, Advanced Control Techniques for Process Industries, SICE Annual Conference in Fukui, August 2003

[PASQUALINI 2002], PASQUALINI François, Using Global Process Control in Semiconductor Manufacturing fabs to achieve APC, micromagazine, <http://www.micromagazine.com>, 2002

[PILLET 2001], PILLET Maurice, La maîtrise statistique des procédés, Editions d'Organisation, 2001

[QIN 2006], QIN Joe, Semiconductor manufacturing process control and monitoring : A fab wide framework, Journal of Process Control (to be published), 2006

[SCANLAN 2003], SCANLAN John, Knowledge-based process control for fault detection and classification, Proceedings of SPIE, Vol. 5044, p.139-149, 2003

[TOPRAC 1999], TOPRAC Anthony J., AMD's Advanced Process Control of Poly-gate Dimension, SPIE Conference on Process, Equipment, and materials Control in Integrated Circuit Manufacturing, Santa Clara, California, Septembre 1999

Chapitre 1

L'analyse statistique de données : pré requis, Algorithmes & Méthodologie

I- Introduction	24
II- Développement d'un environnement adéquat pour la réalisation des analyses de données	25
III- Les outils d'analyse de données appliqués au domaine des semi-conducteurs	37
IV- Méthodologie de corrélation entre les mesures électriques et physiques et les paramètres des équipements	54
V- Conclusion	57
Bibliographie	59

Chapitre 1 : L'analyse statistique de données : pré requis, Algorithmes & Méthodologie

I- Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les principales composantes de l'analyse statistique des données, du choix des variables à étudier jusqu'à la validation des modèles. Nous désignerons par le terme "analyse" les étapes réalisées lors d'une étude de données à savoir [TUFFERY 2005]:

- Définition des objectifs et inventaire des données existantes : cette phase consiste à définir l'ensemble des paramètres que l'on souhaite étudier. Dans ce manuscrit, les paramètres sont les mesures électriques et physiques, les variables des équipements collectées durant le procédé et certaines informations contextuelles (nom du lot, de la plaque, du produit, ...),
- Collecte et extraction de données des différentes bases : au cours de cette phase, la base de données qui servira à la création des modèles est constituée. Chaque colonne de cette base représente un paramètre et chaque ligne, une observation,
- Première exploration et préparation des données : cette étape consiste à "nettoyer", à mettre en forme les données ainsi qu'à choisir le type d'algorithme que l'on va utiliser en fonction de la nature des variables. Cette étape vise en particulier :
 - o A supprimer les valeurs aberrantes (erreurs de mesure, ...) et à créer des combinaisons linéaires de variables, physiquement plus pertinentes,
 - o A vérifier les hypothèses concernant la distribution de chacune des variables. Les algorithmes généralement utilisés nécessitent une distribution Gaussienne de chacune des variables,
 - o A choisir l'algorithme de modélisation en fonction des objectifs d'analyse fixés et de la nature des données.
- Elaboration du modèle : ceci est la principale étape de l'analyse de données, même si elle n'est pas toujours la plus longue.

Remarque : ce modèle établi n'est valable que dans le domaine de variations des facteurs étudiés.

- Validation du modèle : cette phase permet de valider le modèle établi de manière :
 - o Statistique, en testant si le modèle est toujours valide lorsque l'on étudie une autre base de données que l'on appellera par la suite base de test,

- Physique, en confrontant le modèle établi et la réalité physique. Les modèles mathématiques élaborés ne sont pas toujours cohérents avec la réalité,

Le premier paragraphe de ce chapitre propose une vue d'ensemble des principales caractéristiques d'un environnement adéquat pour la réalisation des analyses de corrélations en décrivant particulièrement les problématiques entrant en jeu lors des étapes "d'inventaire des données existantes" et "de collecte et d'extraction des données des différentes bases". En particulier, nous reviendrons sur les pré-requis nécessaires en terme d'infrastructure informatique pour la collecte et la centralisation des données dans les différentes bases de données. Ce paragraphe proposera également des approches permettant de diminuer les sources de variabilité constatées sur les données liées aux étapes de mesures.

Dans le second paragraphe, nous détaillerons plus précisément l'étape de "première exploration et préparation des données". Nous décrirons les principaux algorithmes de prétraitement utilisés lors de la préparation des données. Finalement, nous présenterons les principales techniques d'analyses descriptives et prédictives couramment utilisées en statistique.

Le troisième paragraphe présentera un état des lieux des algorithmes et des logiciels d'analyses utilisés au début de cette thèse au sein du site de Crolles 2 et plus généralement dans le domaine des semi-conducteurs. Nous montrerons par la suite comment les algorithmes d'analyses multivariées et neuronales, déjà utilisés dans d'autres secteurs industriels, permettent de combler les lacunes existantes dans le domaine de la microélectronique.

Le dernier paragraphe propose une méthodologie de caractérisation, de réduction et de contrôle de la variance des procédés de fabrication basée sur l'utilisation de ces algorithmes avancés.

II- Développement d'un environnement adéquat pour la réalisation des analyses de données

Les deux premières étapes d'une analyse de données sont le choix et l'extraction des données à étudier. Afin de développer une méthodologie de corrélation efficace, il est nécessaire d'étudier des données correctement structurées et caractéristiques des procédés de fabrication que l'on souhaite analyser. Cela implique :

- Des moyens de collectes de données,
- Des bases de données cohérentes et unifiées pour extraire et structurer facilement des données provenant de bases différentes,
- Que la variabilité des données induite par les opérations de mesure soit la plus faible possible,
- De tenir compte de l'ensemble de la variabilité induite par les procédés. L'analyse des données provenant des plaques de 300mm requiert donc de tenir compte de la variabilité intra-plaque.

La première partie de ce paragraphe présente les bases informatiques nécessaires en terme de collecte et de structuration des données pour la réalisation des analyses de corrélations. Nous reviendrons plus particulièrement sur la notion d'accessibilité aux données par les différents outils utilisés au cours de ces travaux. La seconde partie proposera des méthodes statistiques permettant d'aligner différents profils de mesures afin de caractériser complètement les variations des procédés de fabrication.

II.1- La collecte des données et la centralisation des données

II.1.a- La collecte des données

La première étape consiste à collecter les données nécessaires aux analyses à savoir :

- Les mesures de métrologie, } Paramètres collectés par tout site de production de semi-
- Les mesures électriques PT, } conducteurs
- Les données FDC provenant des équipements,
- Les données R²R,
- Le suivi du cheminement des plaques tout au long des étapes de fabrication. Cette information contextuelle indispensable pour toute analyse nous renseigne notamment sur la position de chacune des plaques dans les fouds⁹ et les équipements de fabrication. Cette information permet :
 - o De garantir qu'aucune inversion de plaques n'est réalisée à l'intérieur même d'un lot,
 - o De connaître la position de chaque plaque dans les équipements de fabrication multi plaques. Par exemple, dû aux phénomènes d'écoulements des gaz et de transfert thermique lors des étapes de dépôt à haute température, l'épaisseur déposée n'est pas identique en haut et en bas du four.

Remarque : afin de rendre plus aisées les analyses de corrélations, il faut diminuer au maximum les sources d'erreurs dues aux mesures. En effet, plus la variabilité associées aux mesures est importante, plus la variabilité provenant des procédés de fabrication est noyée dans le bruit de mesure et donc difficile à analyser. L'analyse des différences entre les équipements de mesures se base sur l'analyse des capacités des équipements (Cpm) [PELISSIER 2004]. Les Figure 5 (a) et (b) représentent deux exemples de calcul de Cpm respectivement associés à une faible et une forte variabilité de mesure :

⁹ Le foudp représente le container utilisé pour le transport des plaques entre les opérations de la ligne de production. Un foudp peut contenir jusqu'à 25 plaques.

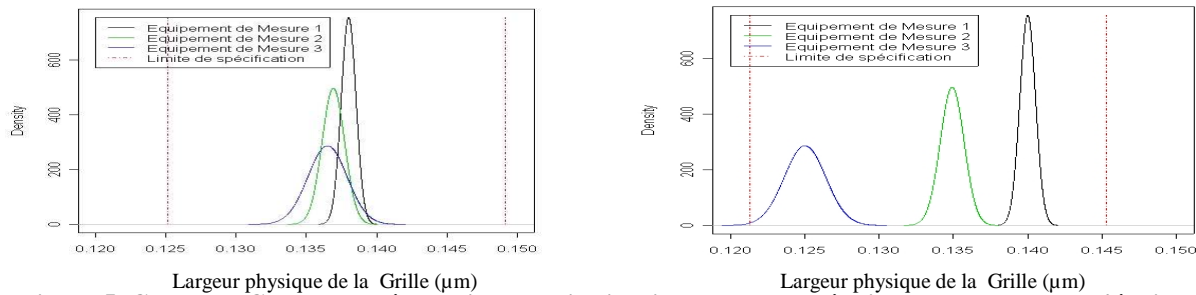


Figure 5. Calcul du Cpm et représentation des distributions de chaque équipement de mesure d'épaisseur d'oxyde de grille. 2 cas : Faible (a) et forte (b) variabilité due à la mesure.

II.1.b- La centralisation des données :

Chaque type de données (FDC, PT, ...) doit être architecturé dans une base de données. L'objectif étant de réaliser des analyses entre ces divers paramètres, il est nécessaire que chacune de ces bases de données ait une structure uniformisée afin que le ou les outils de corrélations puissent avoir accès aisément aux informations. La Figure 6 présente un état des lieux de l'implémentation des différentes bases de données présentes sur le site de Crolles 2 établi en janvier 2006 :

- Deux bases de données disponibles : mesures électriques et physiques,
- Base de données FDC en cours de construction,
- Base de donnée de rendement non construite.

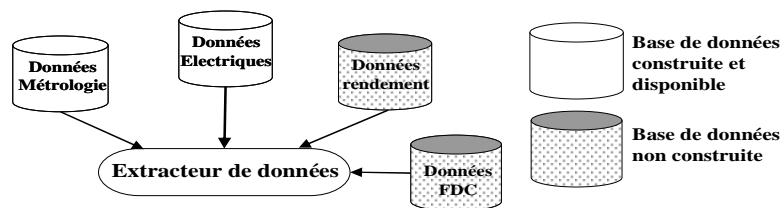


Figure 6. Statut de l'implémentation des bases de données sur le site de Crolles 2 en janvier 2006.

La base de données FDC n'étant pas disponible lors de cette thèse, les données provenant des équipements seront extraites directement de chacune des silverboxes connectées ; L'alignement des données FDC avec les données des mesures électriques et physiques étant réalisé manuellement.

II.1.c- L'accessibilité des données par les outils d'analyses :

Chaque base de données doit être accessible par les différents outils d'analyses utilisés sur le site de production afin que ceux-ci puissent importer les données choisies dans leur environnement propre. On distingue ainsi deux types d'accessibilité aux données :

- Accessibilité directe : les outils d'analyse sont connectés aux différentes bases de données existantes. L'extraction des données est réalisée directement dans l'environnement de l'outil, aucun extracteur intermédiaire n'est nécessaire,

- Accessibilité indirecte : les outils d'analyse ne sont pas connectés aux bases de données. Une interface intermédiaire est nécessaire pour extraire et structurer les données des différentes bases.

Le Tableau 1 présente uniquement le statut de l'accessibilité aux données, effectué en janvier 2006, par les outils d'analyses utilisés durant ces travaux. Nous distinguons les outils d'analyse déjà présents sur le site de Crolles 2 au début des travaux et ceux proposés par la suite.

Outils	Nom des outils	Outils d'analyse présents sur le site de Crolles 2				Outils d'analyse proposés	
		Statgraphics	Jmp !	DataPower	SAS	Simca-P	Neuro-one
	Fournisseurs des outils	Statistical Graphics Corp	SAS Corp	PDF solutions	SAS Corp	Umetrics	Nétral
Bases de données	FDC	indirecte	indirecte	indirecte	indirecte	indirecte	indirecte
	Run to Run	indirecte	indirecte	indirecte	indirecte	indirecte	indirecte
	Mesures physiques	indirecte	indirecte	directe	directe	indirecte	indirecte
	Mesures électriques	indirecte	indirecte	directe	directe	indirecte	indirecte

Tableau 1. Accessibilité aux données des outils du site de Crolles 2 (janvier 2006).

Avant de procéder à l'élaboration du modèle, les données extraites doivent être prétraitées. Dans la partie suivante, nous décrivons les principales techniques de prétraitement des données couramment utilisées. Cette phase permet notamment de traiter les données afin de les rendre analysables par les algorithmes statistiques. Nous présenterons également de nouvelles approches introduites pour aligner les profils de mesures sur les plaques ainsi que les principales techniques d'analyses descriptives et prédictives.

II.2- Exploration et traitement des données

Dans la première partie, nous détaillerons la phase exploratoire des données. Les tables de données extraites des différentes bases comportent souvent des mesures aberrantes dues à des erreurs de mesures. Plus généralement, nous verrons dans la suite de ce manuscrit que beaucoup d'algorithmes d'analyse sont applicables seulement si les variables suivent des distributions gaussiennes. Dans la seconde partie de ce paragraphe, nous étudierons les algorithmes de prétraitement des données couramment utilisés afin de se prévenir de tels cas de figure. Dans un troisième temps, nous présenterons les méthodes proposées pour aligner les sites de mesures physiques et électriques. Finalement nous décrirons les différents types d'analyses statistiques descriptives et prédictives que l'on peut appliquer aux données structurées et prétraitées.

II.2.a- Première exploration des données

La phase d'exploration des données consiste généralement à analyser la répartition de l'ensemble des données étudiées. L'outil utilisé dans le cadre de cette thèse est le box plot. Le box plot (ou boîte à moustache) est un graphique synthétique permettant de représenter sur un seul graphique des statistiques telles que la médiane (barre à 50% de la population), les quartiles (25% et 75%) et les déciles (10% et 90%). Il rend aussi compte du niveau d'asymétrie, de la

dispersion et des valeurs extrêmes de la distribution. La Figure 7 présente un exemple de box plot associé à des mesures d'épaisseur d'oxyde après polissage mécano-chimique du niveau d'interconnexion 2.

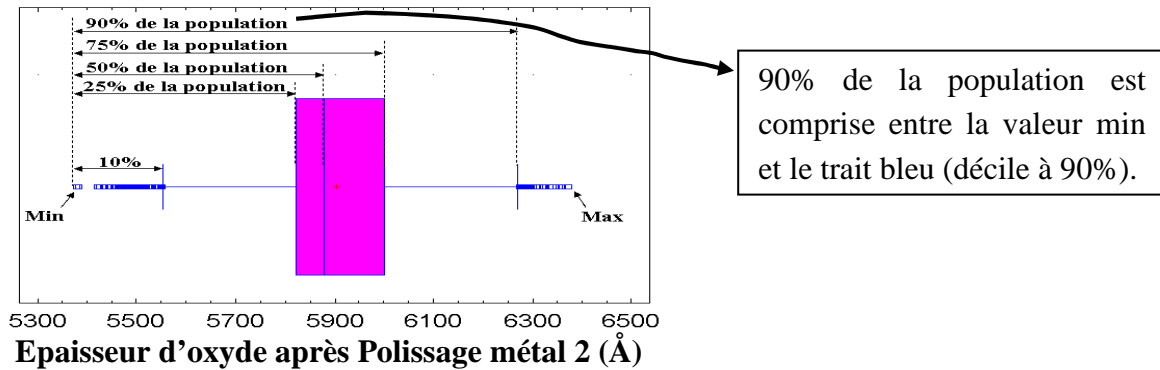


Figure 7. Exemple de représentation d'un box plot.

II.2.b- Prétraitement des données

La plupart des algorithmes impliquent de vérifier certaines hypothèses sur les données. Ainsi avant toute analyse, il est nécessaire de pré-traiter les données afin que ces hypothèses soient vérifiées. Généralement, cette phase d'exploration et de préparation des données comporte deux étapes :

- La première vise à normaliser l'ensemble des données afin d'obtenir des données comparables pour la construction des modèles,
- La seconde consiste à vérifier la forme de la distribution de chacune des variables.

La normalisation des données :

Les variables observées sont rarement à la même échelle. Dans les études qui vont être présentées, on traite par défaut toute variation de façon équivalente pour ne se concentrer que sur les écarts. Pour chacune des variables, les valeurs sont divisées par l'écart type calculé sur cette variable, puis sont centrées (Figure 8). On dispose ainsi de données comparables pour la construction des modèles.

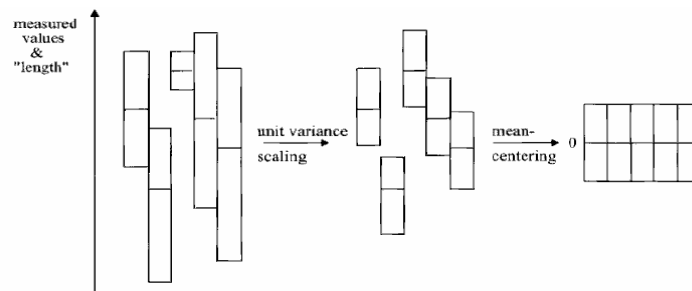


Figure 8. Centrage et réduction des données.

L'expertise physique permet ensuite de conclure quant à la significativité des variations observées.

Distribution des données - Indicateurs de normalité "Skewness" et "Kurtosis" :

La plupart des algorithmes d'analyses de données nécessitent d'avoir une distribution de type gaussienne pour l'ensemble des variables considérées. Afin de vérifier cette hypothèse, deux indicateurs sont généralement employés : le Skewness et le Kurtosis. Ces deux indicateurs nous renseignent sur l'écart existant entre la distribution du paramètre et une loi gaussienne :

- L'indicateur statistique Skewness ou coefficient d'asymétrie nous renseigne sur le manque de symétrie de la distribution des données. Ce paramètre est défini par :

$$Skewness = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3}{n}}{\sigma^3}$$

Avec x_i : valeur de l'observation i ,
 \bar{x} : valeur moyenne de l'ensemble des observations,
 n : nombre d'observations,
 σ : écart-type de l'ensemble des observations.

Si le Skewness est égal à 0, la distribution des données est symétrique (b). Plus cette valeur est proche de 1 en valeur absolue, plus la distribution des données est asymétrique (a & c). Le signe nous renseigne sur la forme de l'asymétrie. Une forte asymétrie de la distribution peut souvent être corrigée par une transformation des données (fonction logarithmique par exemple).

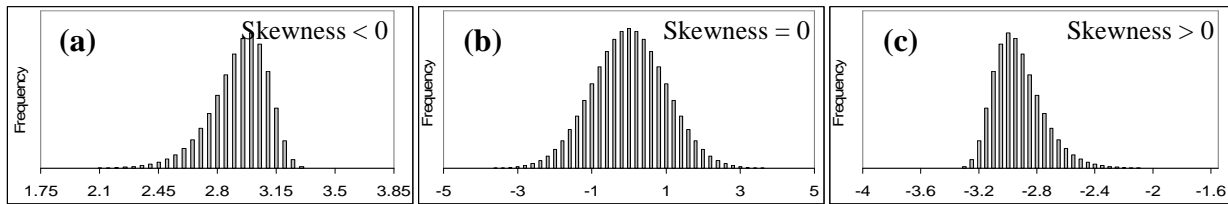


Figure 9. Indicateur Skewness en fonction de la forme de la distribution.

- L'indicateur Kurtosis ou coefficient d'aplanissement nous renseigne sur la forme de la distribution des données. Ce paramètre est défini par :

$$Kurtosis = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^4}{n}}{\sigma^4}$$

Avec x_i : valeur de l'observation i ,
 \bar{x} : valeur moyenne de l'ensemble des observations,
 n : nombre d'observations,
 σ : écart-type de l'ensemble des observations.

La Figure 10 représente 3 formes de distribution. Le coefficient d'aplanissement est égal à 3 pour une loi parfaitement gaussienne (b). Lorsque le Kurtosis est inférieur à 3 alors la forme de la distribution est plus aplatie que celle d'une loi gaussienne (a) tandis que lorsque ce coefficient est supérieur à 3, la distribution est plus concentrée (c).

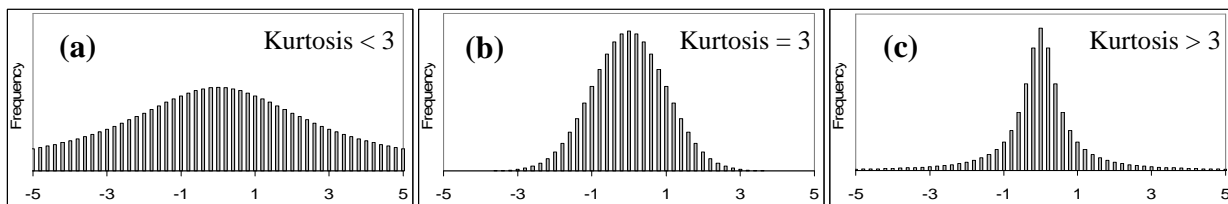


Figure 10. Indicateur kurtosis en fonction de la forme de la distribution.

Dans la suite de ce chapitre, nous reviendrons sur l'importance de ces hypothèses lors des analyses. Toutefois, lors de la présentation des études de modélisation, nous ne reviendrons pas sur ces deux phases pour ne pas alourdir le manuscrit. Les deux phases de prétraitement seront ainsi effectuées de façon transparente pour le lecteur.

Dans la majeure partie des usines de fabrication, les études de corrélations sont effectuées en ne considérant que les grandeurs statistiques au niveau des plaques. Les études utilisant les valeurs individuelles de chaque site de mesure sont rares car les profils de mesures employés ne sont pas toujours identiques. Cependant, avec l'augmentation de la dimension des plaques, la variabilité devient essentiellement intra plaque. Le paragraphe suivant propose une méthode permettant d'ajuster les profils de mesures.

II.2.c- Alignement des sites de mesures sur les plaques

Pour les plaques de diamètre 300mm et les technologies sub120nm, la plus grande source de variation provient majoritairement de la non uniformité intra-plaque. La Figure 11 présente la décomposition de variance des mesures d'épaisseur d'oxyde restant après le polissage STI.

Soit σ_{Tot}^2 la variance totale calculée sur les mesures (avec σ : écart type des mesures).

La méthode d'analyse statistique prédictive (voir paragraphe II.2.d de ce chapitre) d'analyse de la variance (ou ANOVA) permet de décomposer la variance totale suivant les différents effets possibles à savoir [TUFFERY 2005]: les effets lot à lot (traduisant les différences entre les lots), plaque à plaque, site de mesure à site de mesure, équipement à équipement, produit à produit. La variance non expliquée constitue les résidus.

On définit alors :

$$\sigma_{Tot}^2 = \sigma_{Lot}^2 + \sigma_{Plaque}^2 + \sigma_{Site\ de\ mesure}^2 + \sigma_{Equipe\ de\ fabrication}^2 + \sigma_{Equipe\ de\ mesure}^2 + \sigma_{Produit}^2 + \text{Résidus}$$

Cette technique d'analyse sera particulièrement utilisée afin de définir la nature de la variance des mesures physiques ou électriques étudiées.

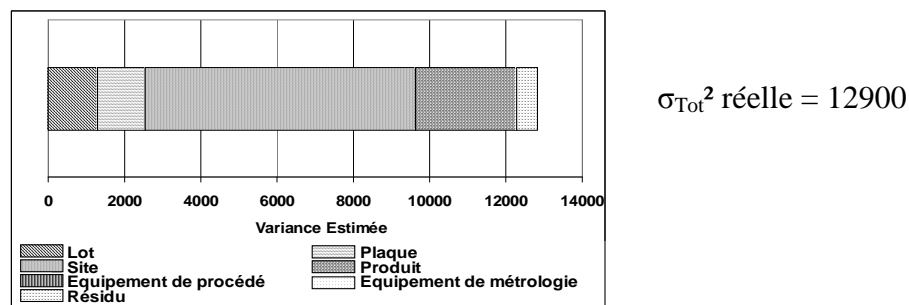


Figure 11. Décomposition de variance de l'épaisseur d'oxyde restant après le polissage STI.

Pour les procédés de polissage mécanico-chimique, l'importance de cette variation peut atteindre jusqu'à 70% de la variation totale. Les analyses standards effectuées en ne considérant que des valeurs statistiques par plaques (moyenne des mesures, ...) n'étudient pas l'ensemble de la variabilité.

Selon la maturité de la technologie, deux méthodes peuvent être utilisées pour caractériser la variabilité intra-plaque :

- Si la technologie étudiée est en phase de développement, il est possible d'aligner les mesures selon un profil de mesure commun. La Figure 12 présente un cas de mauvais alignement (a) ainsi qu'un exemple de bon alignement des sites de mesures (b) :

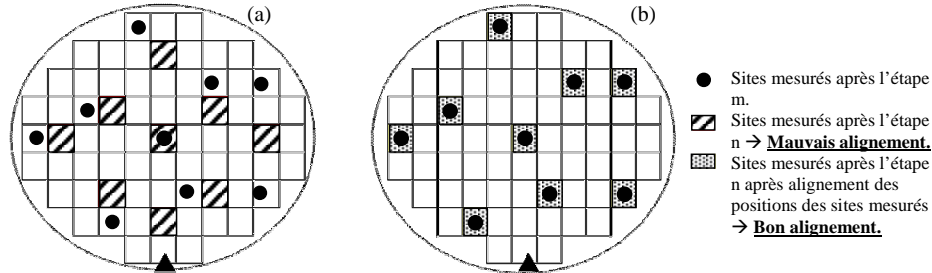


Figure 12. Aligment des profils de mesures.

Sur le site de Crolles 2, toutes les mesures physiques (sauf mesures effectuées au profilomètre) sont réalisées selon un mapping contenant 17 points prédéfinis. Les mesures au profilomètre, plus longues que les mesures ellipsométriques, sont réalisées selon un mapping 9 points qui est le sous-ensemble des 17 points. Pour les plaques de production, les mesures électriques sont également effectuées selon ce mapping 9 points.

- Si la technologie étudiée est en phase de production, il est difficile de changer la position des sites de mesures. Cependant, lorsque les sites de mesure ne se trouvent pas à la même position entre 2 opérations de métrologie, une alternative consiste à modéliser les 2 surfaces à partir des mesures effectuées et de projeter ces 2 surfaces selon un troisième mapping commun (Figure 13).

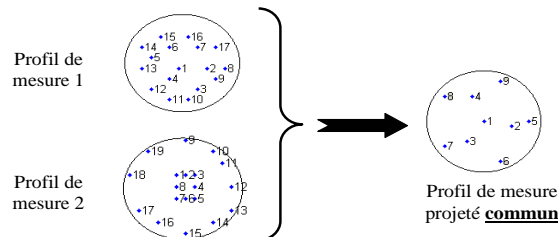


Figure 13. Projection de deux mappings d'entrée différents selon un troisième mapping commun.

L'extrapolation de la surface nécessite toutefois une excellente qualité de modélisation. Cependant, la plupart des logiciels disponibles n'offre pas cette qualité d'extrapolation. Afin de pouvoir réaliser ce type de modélisation de surface, une application permettant de modéliser l'ensemble de la surface de la plaque à partir d'un mapping d'entrée a été développé en collaboration avec la société MASA¹⁰. Dans la suite de ce paragraphe, nous présenterons seulement la philosophie d'une telle application. Nous reviendrons plus en détail sur l'aspect algorithmique dans la partie II.3.d.

¹⁰ Mathématiques Appliquées S.A.

Principe d'interpolation basé sur algorithmes apprenant à fonction radiale de base (RBF) :

Les logiciels couramment utilisés dans le domaine de la microélectronique utilisent généralement des algorithmes de types polynomiaux pour réaliser les interpolations. Ce type de modélisation offre une bonne qualité de modélisation proche des points de mesures mais une faible qualité loin de ces zones (chaque interpolation entre 2 points de mesure est traité individuellement, sans prendre en compte de la forme globale de la surface). La Figure 14 montre que, pour la couronne surlignée en rouge dans la représentation de gauche, l'interpolation entre les points de mesures ne reflète pas du tout la réalité (creux modélisés entre 2 points de mesures n'existant pas en réalité).

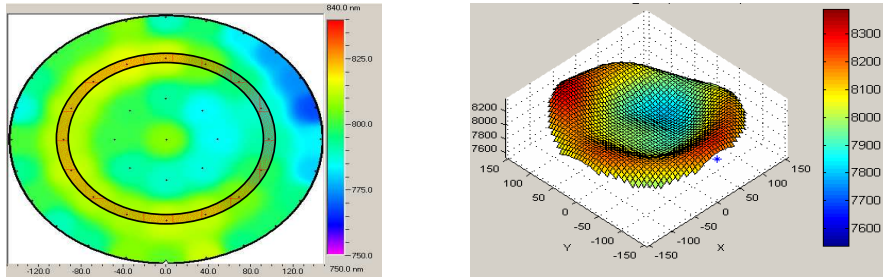


Figure 14. Comparaison entre une interpolation de type polynomiale et la réalité.

Afin de palier à ce manque de qualité de modélisation de surface préjudiciable lors des analyses au niveau des sites de mesure, la solution est d'utiliser des algorithmes d'apprentissage [DREYFUS 2002]. Ces modélisations sont basées sur des algorithmes mettant jeu des combinaisons de fonctions ROUSSOS 2005], [NERUDA 2005]. Les fonctions radiales de base (RBF) sont des sommes pondérées de translations de fonctions symétriques augmentées d'un polynôme de degré k. Elles s'expriment :

$$S(x) = p(x) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \phi(|x - x_i|)$$

Avec $p(x)$: polynôme de degré k,

λ_i : poids attribué à la fonction Φ ,

Φ , fonction de base (par exemple $\Phi(x) = \exp(-cx^2)$),

$|x-x_i|$ distance entre le point extrapolé et le point effectivement mesuré.

Plus réguliers que les interpolations polynomiales, les algorithmes de type RBF permettent d'apprendre une forme de surface en ajustant les coefficients de la fonction $S(x)$.

Qualité des modélisations :

L'utilisation des fonctions radiales de base permet une modélisation de très bonne qualité de la surface de la plaque même loin des points de mesure. Le Tableau 2 présente une comparaison entre les grandeurs statistiques réelles et celles calculées suite à des interpolations de types polynomiales et de type fonctions radiales de base pour différents profils de mesures.

Type d'interpolation	Grandeurs statistiques	Nombre de points mesurés			
		177 points	49 points	28 points	17 points
Valeurs réelles	Moyenne (Å)	8061.36			
	Ecart Type (Stdev) (Å)	149.44			
Interpolation polynomiale	Moyenne (Å)	8064.86	8072.77	8102.19	8008.81
	Stdev (Å)	120.73	133.03	86.32	78.45
Interpolation RBF	Moyenne (Å)	8064.86	8064.13	8036.74	8084.90
	Stdev (Å)	120.73	146.937	107.696	182.103
Gain interpolation RBF / Polynomiale	Gain sur la moyenne (%)	0 %	1 %	3 %	5 %
	Gain sur la Stdev (%)	0 %	9 %	15 %	26 %

Tableau 2. Comparaison des statistiques réelles et modélisées à partir des algorithmes polynomiaux et RBF.

L'interpolation réalisée avec l'algorithme RBF à partir du profil de mesures à 17 points (profil utilisé en production) est similaire au profil réel et de meilleure qualité que l'interpolation polynomiale.

Perspective d'utilisation des algorithmes RBF :

Grâce à la qualité des modélisations, cette nouvelle approche peut être envisagée pour définir de nouveaux indicateurs afin d'améliorer la pertinence du contrôle statistique des procédés - SPC [ALEGRET 2005]. Ce "nouveau" SPC, plus pertinent que celui couramment utilisé ne considérant que la moyenne et l'écart type des mesures, permet de détecter des variations de formes des profils. Ce type d'interpolation pourra également être appliqué aux boucles de régulation en tant que module de pré-traitement. En effet, une grande qualité d'interpolation pourra permettre de réguler les procédés au niveau des sites de mesures et non au niveau des plaques ou des lots comme cela est le cas habituellement.

La partie suivante de ce chapitre décrit les principaux types d'analyses statistiques. Cette présentation exhaustive permettra par la suite de soulever les lacunes du site de Crolles 2.

II.2.d- Elaboration du modèle - Analyses statistiques descriptives et prédictives

Les techniques d'analyse statistiques de données se répartissent en deux grandes familles :

- Les techniques descriptives résument et synthétisent les données : dans ce type d'analyse, il n'y a pas de valeur cible. Ces analyses permettent de décrire un phénomène et sont très utiles en microélectronique pour comparer les paramètres FDC d'un équipement avant et après maintenance par exemple,

- Les techniques prédictives expliquent les données : dans ce type d'analyse, on cherche à modéliser les variations d'une ou plusieurs variables cibles en fonction des variations de variables explicatives. Dans le domaine des semi-conducteurs, ces analyses sont couramment employées pour analyser les pertes en rendements en fonction des résultats électriques et physiques obtenus lors de la fabrication des circuits [ALEGRET 2003] ou

modéliser les variations des mesures physiques en fonction des paramètres des équipements,

Le Tableau 3 propose une classification exhaustive des techniques d'analyses descriptives et prédictives utilisées en statistique [TUFFERY 2005], [BERGERT 2004], [SAPORTA 2004] :

Type	Famille	Sous-famille	Algorithme	
Méthodes descriptives	Modèles géométriques	Analyse factorielle	Analyse en Composante Principale ACP (variables continues)	
			Analyse en Composante multiple ACM (variables catégorielles)	
		Analyse typologique	Méthode des centres mobiles, des k-means, des nuées dynamiques	
			Classification hiérarchique	
	Modèles combinatoires	Analyse typologique + réduction de dimension	Classification neuronale (réseaux de Kohonen)	
			Classification relationnelle	
		Modèles à base de règles logiques	Détection de liens	Recherche d'associations
	Recherche de séquences similaires			
Méthodes prédictives	Modèles à base de règles logiques	Arbres de décision	Arbres de décision : variable à expliquer continue (arbre de décision) ou catégorielle (arbre de classification)	
	Modèles à base de fonctions mathématiques	Réseaux de neurones	Réseaux à apprentissage supervisé (Perceptron, Réseau à fonction radiale de base ...)	
		Modèles paramétriques ou semi paramétriques		Régression linéaire, ANOVA, MANOVA, ANCOVA, MANCOVA, modèle linéaire général GLM, régression PLS (variable à expliquer continue)
				Analyse discriminante de Fisher, régression logistique, régression logistique PLS (variable à expliquer catégorielle)
				Modèle log-linéaire (variable à expliquer = comptage = nombre d'individus prenant une combinaison donnée de modalités de variables qualitatives)
				Modèle linéaire généralisé GLZ, modèle additif généralisé GAM (variable à expliquer continue, discrète, comptage ou catégorielle)
	Prédiction sans modèle	Analyse probabiliste	k-plus proche voisins (k-NN)	

Tableau 3. Classification exhaustive des techniques d'analyses de données descriptives et prédictives.

Les études de corrélation menées dans le cadre de cette thèse nous amèneront plus particulièrement à utiliser les techniques prédictives afin :

- De quantifier les corrélations existantes entre une variable ou un groupe de variables à expliquer, avec un ensemble de variables explicatives,
- De déterminer quelle est la nature des variations (inter-lot, intra-lot, intra-plaque).

Le Tableau 4 [TUFFERY 2005] explicite plus précisément le type d'analyses prédictives employées en fonction de la nature des variables explicatives et à expliquer. Dans le cadre des travaux effectués, les analyses prédictives utilisées sont décrites dans les deux premières lignes de ce tableau.

Explicatives A expliquer	1 quantitative (covariable)	N quantitatives (covariables)	1 qualitative (facteur)	N qualitatives (facteurs)	Mélange
1 quantitative	Régression linéaire simple, régression robuste, arbres de décisions	Régression linéaire multiple, régression robuste, régression PLS, arbres de décisions, réseaux de neurones	ANOVA, arbres de décisions	ANOVA, arbres de décisions, réseaux de neurones	ANCOVA, GLM univarié, arbres de décisions, réseaux de neurones
N quantitative (représentant des quantités différentes)	Régression PLS2	Régression PLS2, réseaux de neurones	MANOVA	MANOVA, réseaux de neurones	GLM multivarié, réseaux de neurones
1 qualitative nominale	Analyse discriminante de Fisher, régression logistique, arbres de décisions	Analyse discriminante de Fisher, régression logistique, régressions logistiques PLS, arbres de décisions, réseaux de neurones	Table de Contingence, Régression logistique, analyse discriminante, arbres de décisions	Régression logistique, analyse discriminante, arbres de décisions, réseaux de neurones	Régression logistique, arbres de décisions, réseaux de neurones
N qualitatives nominales		Réseaux de neurones		Réseaux de neurones	Réseaux de neurones

Tableau 4. Liste des analyses prédictives employées en fonction de la nature des variables à expliquer et des variables explicatives.

Les deux tableaux précédemment décrits montrent qu'il existe une multitude d'algorithmes d'analyse. Le choix de l'algorithme à utiliser dépend :

- Du type d'analyse que l'on souhaite effectuer (descriptive ou prédictive),
- De la nature des données (quantitatives ou qualitatives),
- Et des relations que l'on cherche à mettre en évidence (linéaire ou non linéaire).

Le paragraphe suivant propose un état des lieux des techniques d'analyses proposées par les outils disponibles sur le site de Crolles 2 et plus généralement dans le milieu de la microélectronique. L'objectif de cet état de l'art est d'identifier, en fonction des problématiques rencontrées, les lacunes en terme d'algorithmes. De nouvelles solutions seront ensuite proposées pour combler ces manques.

III- Les outils d'analyse de données appliqués au domaine des semi-conducteurs

III.1- Les limitations des méthodes et des outils d'analyse "standard" utilisés dans le domaine microélectronique

Aujourd'hui, le contexte technologique microélectronique nécessite d'affiner à l'extrême la compréhension des phénomènes physiques intervenant lors de la fabrication des circuits intégrés. Pour ce faire, nous disposons de moyens d'observations pour la collecte de données sur un nombre important de paramètres (mesures physiques et électriques, paramètres des équipements).

Une première conclusion est que, face au volume de données engendré, les analyses traditionnelles deviennent vite fastidieuses et incomplètes si l'intégralité des données est conservée. Une solution pour un expert est de se fier à son expérience pour se focaliser sur ce qu'il "sait" être une piste de réflexion et éliminer les données "sensées" avoir une importance moindre. Une autre solution est d'utiliser des systèmes basés sur des algorithmes avancés capables d'extraire des informations pertinentes d'un grand volume de données [KETTANETHA 2005].

Le Tableau 5 reprend les techniques prédictives décrites dans le Tableau 3 précédent en explicitant les fonctionnalités des différentes méthodes et outils d'analyses présents sur le site de Crolles 2 et plus généralement dans le milieu de la microélectronique.

Algorithme	Outils d'analyse présents sur le site de Crolles 2				Outils d'analyse proposés	
	Stat Graphics	Jmp !	DataPower	SAS	Simca-P	Neuro-one
Arbres de décision (variable à expliquer continue ou catégorielle)						
Réseaux à apprentissage supervisé (Perceptron multicouche, Réseau à fonction radiale de base)		Algorithmes basics				
Régression linéaire, ANOVA, MANOVA, ANCOVA, MANCOVA, modèle linéaire général GLM, régression PLS (variable à expliquer continue)	Algorithmes basics	Algorithmes basics	Algorithmes basics	Algorithmes basics	Régression PLS	
Analyse discriminante de Fisher, régression logistique, régression logistique PLS (variable à expliquer catégorielle)	Régression PLS non disponible	Algorithmes basics	Régression PLS non disponible	Algorithmes basics	Régression PLS	
Gestion des valeurs manquantes					(NIPALS)	

Tableau 5. Synthèse des algorithmes d'analyse présents sur le site de Crolles2 et des outils proposés.

Chacun des logiciels couramment utilisés sur le site de production sont basés sur des algorithmes simples. Certaines limitations algorithmiques employées par ces outils sont préjudiciables lors de l'élaboration des modèles :

- Le nombre d'observations doit systématiquement être plus important que le nombre de variables étudiées,
- Ces outils gèrent très mal des tableaux de données présentant des valeurs manquantes. La solution standard employée consiste à supprimer les observations ayant des valeurs manquantes. En microélectronique, ce type de traitement nous coupe d'une grande source d'information puisque dans ce domaine, il est fréquent que des mesures ne soient pas réalisées ou que certaines valeurs mesurées soient aberrantes (erreurs de mesures). Ceci entraîne une perte d'information lors des analyses,
- Ces solutions logicielles ne peuvent modéliser qu'une variable à la fois.
- Les techniques employées ne permettent pas d'étudier les corrélations entre les variables explicatives,
- Les algorithmes utilisés ne permettent pas de modéliser des comportements fortement non linéaires.

L'état de l'art précédemment établi a permis d'identifier les lacunes en terme d'analyse de données du site de Crolles 2. Pour palier à ces manques, deux solutions logicielles sont proposées :

- Simca-P : logiciel d'analyse multivariée de données proposant des analyses descriptives (ACP - ACM) et prédictives (PLS) capables de modéliser de larges tableaux de données avec valeurs manquantes. Ces techniques permettent aussi de déterminer les corrélations entre les variables,
- Neuro-one, proposé par la société Netral : logiciel d'analyse de données, basé sur les réseaux de neurones, capable de modéliser des comportements non linéaires.

Dans les paragraphes suivants, nous décrivons les méthodes d'analyses employées par ces deux outils. Nous montrerons que ces approches, qui ont déjà fait leurs preuves dans les autres secteurs industriels tels que l'industrie chimique, pharmaceutique ou automobile sont des outils apportant une grande valeur ajoutée pour le domaine de la microélectronique.

III.2- Les méthodes d'analyse statistiques multivariées type ACP et PLS

Les analyses multivariées permettent d'analyser les corrélations entre plusieurs variables dites explicatives (analyses ACP et ACM), ou entre un groupe de variables explicatives et un ensemble de variables à expliquer (PLS) [ERIKSSON 2001], [UMETRICS 2005]. La qualité des modélisations repose en grande partie dans le prétraitement des données et dans la puissance des algorithmes de modélisation. L'approche multivariée est spécialement adaptée pour la

modélisation de phénomènes physiques. La particularité de ces modélisations tient en la possibilité d'étudier un nombre important de variables (plusieurs dizaines) avec peu d'observations (10 à 20). De nombreux logiciels proposent ce traitement statistique multivarié :

- Simca-P,
- Unscrambler,
- SAS,
- Jmp!,
- Statgraphics,
- R.

Contrairement aux autres logiciels précédemment cités, Simca-P utilise l'algorithme NIPALS, particulièrement adapté pour le traitement de tables de données avec valeurs manquantes [TENENHAUS 1998]. Ce cas de figure étant très courant dans le domaine des semi-conducteurs, nous utiliserons de préférence ce logiciel pour le traitement de nos données. La description des approches descriptives (ACP) et prédictives (PLS) s'appuiera sur l'interface de cet outil. Les analyses multivariées effectuées dans le cadre de ces travaux sont essentiellement de type prédictif. L'ACP est toutefois présentée ci dessous pour faciliter la compréhension de la régression PLS.

Simca-P est à priori un outil d'ingénierie permettant un traitement des données sans connexion avec un équipement. Il accepte en entrée des fichiers sous différents formats, notamment .txt, .csv et .xls. Ce logiciel offre la possibilité d'analyser l'évolution des paramètres, en valeur moyenne (moyenne des paramètres sur une étape du procédé) ou en temporel, tout au long du traitement de la plaque ou uniquement pendant une étape.

III.2.a- L'analyse en composante Principale (ACP)

Principe de l'Analyse en Composante Principale

L'analyse en Composante Principale (ACP) est le point de départ des analyses de données multivariées [JACKSON 1991], [WOLD 1987]. La formulation statistique de cette approche fut introduite la première fois par Pearson en 1901 [JACKSON 1991]. L'analyse ACP consiste à générer des variables synthétiques par combinaison linéaire des variables initiales. La génération des variables synthétiques est un problème équivalent à la minimisation des distances de projections : on procède à une régression au sens des moindres carrées. On peut générer plusieurs axes de régression, construits orthogonaux deux à deux, c'est-à-dire décorrélés entre deux. Ces axes sont nommés 'Composantes Principales'. La régression ACP est légèrement différente de la régression classique des moindres carrés : la projection orthogonale sur l'axe est minimisée alors que dans une régression classique, on minimise la distance verticale

La première composante principale (PC1) correspond à l'axe de variance maximum sur les individus. Pour le deuxième axe, on réitère la régression mais en se restreignant à ce que le premier axe n'a pu expliquer. Autrement dit, on utilise à la place des données originelles les résidus issus de la première régression. On réitère la méthode pour obtenir les axes suivants. On peut construire ainsi p composantes principales orthogonales, p étant le rang de la matrice de données initiales.

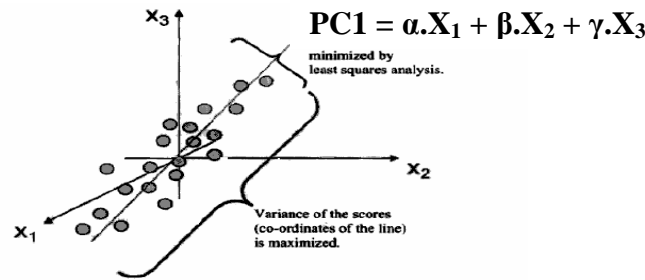


Figure 15. Exemple de régression ACP en dimension 3
(le principe de la régression est le même en dimension 2, 3, 4 ou plus).

L'intérêt d'une telle analyse pour l'étude d'un phénomène complexe est de ne donner de valeur à une information que si elle se vérifie de façon globale. On peut ainsi minimiser l'impact des données aberrantes et appréhender les informations dans leur globalité.

Visualisation des résultats selon les deux premières composantes

- Le logiciel Simca-P nous permet de visualiser l'ensemble des observations suivant les p composantes principales calculées.

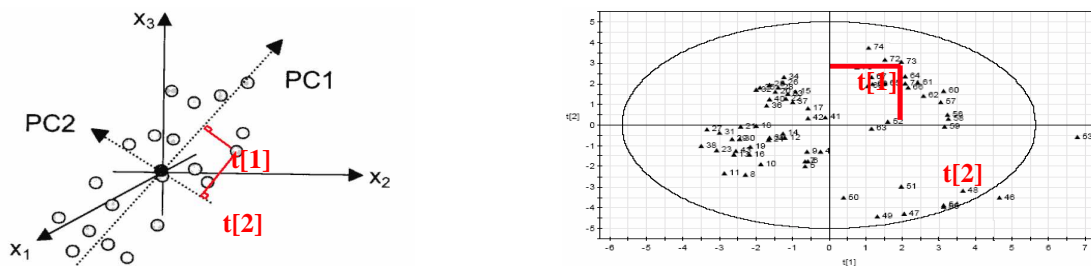


Figure 16. Principe de la régression ACP pour un système à 3 dimensions (projections des observations sur ces deux axes (a). Représentation des observations dans le nouvel espace 2D (b)).

Cette représentation nous permet de voir d'éventuelles données aberrantes, la formation de groupes de populations ou d'apprécier l'uniformité d'une population. L'ellipse de tolérance représentée sur le graphique ci-dessus correspond à la région de confiance qui nous est donnée par l'outil statistique Hotelling's T^2 [YE 2000]. En schématisant, Hotelling's T^2 évalue la position de chaque point par rapport à la construction des composantes principales et par rapport à l'ensemble des données. Cet outil est aujourd'hui utilisé pour réaliser de la détection multivariée en temps réel [BUCLON 2005].

- Afin d'identifier les corrélations entre les variables initiales, les coefficients de corrélation peuvent également être représentés suivants les p composantes calculées. On évalue tout d'abord la corrélation de chaque variable initiale avec chaque composante principale pour finalement avoir une évaluation des corrélations entre les variables initiales. Le coefficient de corrélation est donné par le cosinus de l'angle formé entre les variables initiales et les composantes principales. La Figure 17 nous informe sur les corrélations existantes entre les paramètres dans la gamme de variation étudiée. Les deux

composantes principales forment un plan dans lequel on représente les coefficients de corrélation.

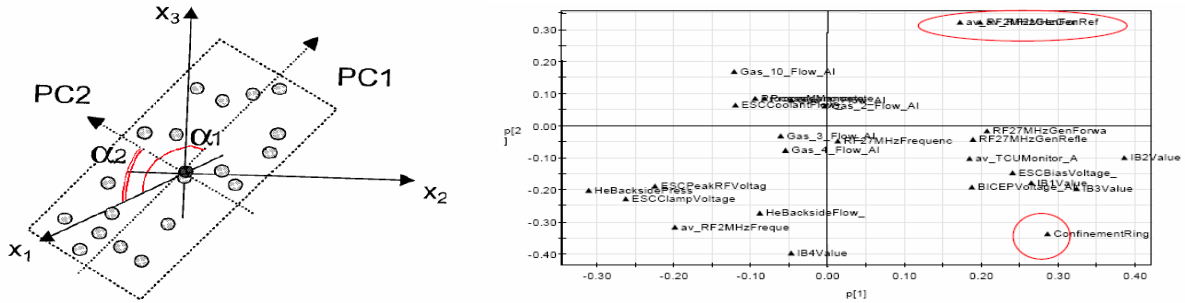


Figure 17. Corrélation entre variables initiales et composantes principales.

Pour l'exemple ci-dessus, les variables les plus éloignées du centre sont les plus corrélées. En haut à droite, 'av_RF2MhzGenFor' et 'av_RF2MhzGenRef' sont fortement corrélées sur les deux premières composantes et ces variables sont fortement anti-corrélées avec 'ConfinementRing' sur la deuxième composante.

L'analyse en Composante Principale s'avère très utile pour appréhender les corrélations entre les variables explicatives lorsque le nombre de ces variables devient très important. Cela, permet, dans le domaine de variations de chacune des variables, de décrire les principaux phénomènes en projetant l'ensemble des observations dans un espace de dimension inférieure.

III.2.b- L'analyse Partial Least Square (PLS)

Principe de l'analyse Partial Least Square

L'origine de l'approche PLS vient de Herman Wold qui proposa cette méthode en 1975 pour le traitement d'importants volumes de données. La régression PLS a ensuite été proposée en 1983 par Svante Wold & Al pour des applications plutôt ciblées dans le domaine de la chimie. Toutefois, nous verrons par la suite que les possibilités de cette méthode dépassent largement le cadre de ce domaine.

La régression PLS est une méthode qui permet d'estimer les coefficients d'un polynôme d'ajustement entre une (PLS1) ou plusieurs (PLS2) variables(s) à expliquer Y_k et un ensemble de variables explicatives X_i sur la base d'un modèle dont le degré est défini par l'analyste et qui peut contenir des effets directs (X_i), d'ordre 2 (X_i^2), d'ordre 3 (X_i^3) et des interactions ($X_i X_j$).

La régression PLS généralise et combine les caractéristiques de l'analyse en composantes principales et de la régression multiple. On dispose de deux blocs de données, un bloc constitué de variables d'entrées explicatives, et un bloc constitué de variables de sortie à expliquer. La régression PLS estime directement les coefficients d'influence sur Y_k attribuables à chaque variable explicative X_i par le biais de composantes hiérarchisées qui matérialisent les faisceaux de relations constatés entre les tableaux des variables d'entrée et de sortie sous la contrainte dite de maximisation de la matrice de covariance ($X ; Y$) [TENENHAUS 1998]. De façon un peu plus

concrète, on ne cherche plus seulement à définir les relations à l'intérieur d'un groupe de variables d'entrée mais à expliquer les variations constatées sur les variables de sortie en fonction des variations observées dans le tableau des variables d'entrée.

Géométriquement, pour ce type d'analyse, on représente l'ensemble des observations dans l'espace des variables X_i et l'espace des réponses Y_k . Dans le chapitre précédent, on effectuait une seule régression mais cette fois, on effectue deux régressions, une dans l'espace d'entrée, une dans l'espace de sortie. Dans la suite de ce manuscrit, nous nous intéresserons principalement à la recherche de corrélation entre un ensemble de variables d'entrées X_i et une seule variable en sortie Y . De nombreux ouvrages décrivent la démarche géométrique et statistique de calcul des composantes [TENEHAUS 1998].

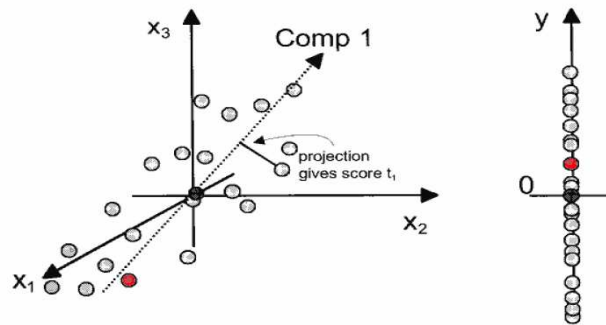


Figure 18. Représentation des observations lors d'une analyse PLS
(nous avons maintenant une représentation des observations dans deux espaces, celui des paramètres d'entrées et celui de mesures de sorties).

La première composante est une fonction qui caractérise au mieux les variations observées dans l'espace des X_i comme lors d'une ACP standard et qui définit aussi une bonne corrélation dans l'espace des Y (Figure 18). L'ensemble des observations t_1 des variables sur l'axe de régression $\text{Comp}1$ est considéré comme une nouvelle variable. Cette variable est pondérée par un coefficient c_1 (calculé par l'algorithme lors de l'analyse) tel que $\hat{Y}_{(1)} = c_1 * t_1$ décrive au mieux les variations de Y . La différence entre la valeur estimée $\hat{Y}_{(1)}$ et la valeur réelle Y constitue le résidu (variations de Y non expliquée par la première composante définie dans l'espace des X).

La seconde composante est une fonction orthogonale à la première qui améliore autant que possible la description des variations des X donnant aussi une bonne corrélation dans l'espace des Y .

L'ensemble des projections t_2 des observations sur l'axe de régression $\text{Comp}2$ est considéré comme une seconde nouvelle variable. Cette variable est pondérée par un coefficient c_2 tel que $\hat{Y}_{(2)} = \hat{Y}_{(1)} - Y = c_2 * t_2$ décrive au mieux les variations du résidu obtenu après le calcul de la première composante.

Visualisation des résultats sous le logiciel Simca-P – Graphique d'Importance des Variables dans la Projection (VIP)

Chacune des composantes établies nous informe de l'importance des variations de chacune des variables d'entrée sur les variations des variables de sortie. Sous le logiciel utilisé, ce type de représentation s'appelle le VIP. Cet outil considère les observations sur l'ensemble des composantes qui constituent le modèle.

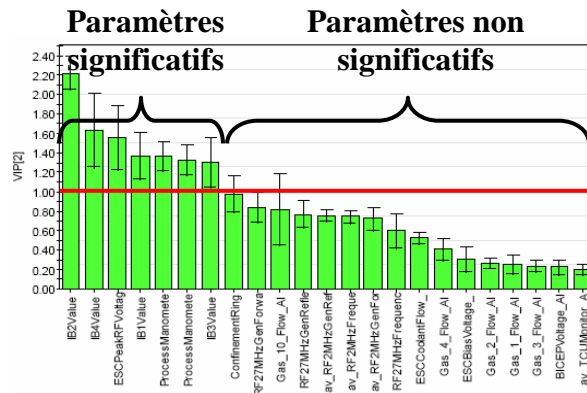


Figure 19. Exemple de graphique d'Importance des Variables dans la projection.

L'ensemble des paramètres étudiés est représenté sur ce pareto. L'axe des ordonnées représente l'influence des paramètres sur les réponses (l'échelle est arbitraire). Chacun de ces paramètres est classé par ordre d'influence sur les réponses : une valeur importante signifie une forte contribution de la variabilité du paramètre sur les variations des réponses. Un paramètre est considéré comme significativement influent si la valeur de sa contribution est supérieure à 1.

Indicateurs de qualité des analyses multivariées sous le logiciel Simca-P (R^2 & Q^2)

Deux indicateurs, R^2 et Q^2 , nous renseignent sur la qualité de la modélisation :

- La valeur du R^2 représente la qualité du modèle établi : pour une analyse type PLS, le R^2 représente le pourcentage de variation de la variable de sortie Y effectivement expliqué par les variations de l'ensemble des variables d'entrée X (valeur de 0 à 1).
- La valeur du Q^2 nous renseigne sur la qualité de prédiction du modèle : l'algorithme calcule de façon itérative plusieurs modèles en enlevant un nombre N prédéfini d'observations. Si ces modèles sont semblables alors la modélisation est prédictive et le Q^2 sera important (valeur maximale égale au R^2).

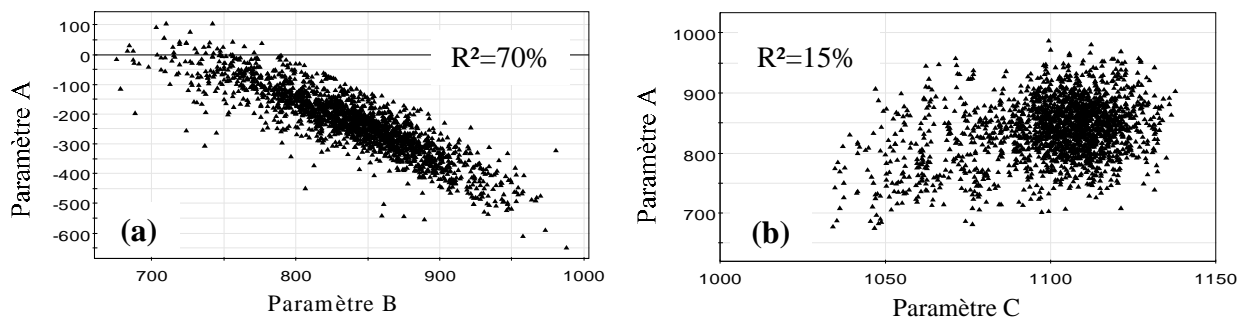
Trois cas de figure peuvent se présenter en fonction des valeurs des indices de qualité :

- R^2 et Q^2 élevés : le modèle établi est explicatif et très prédictif. Dans la gamme de variations des variables étudiées, le modèle pourra être appliqué à d'autres données pour par exemple prédire la valeur de la variable à expliquer en fonction des variables explicatives.

- R^2 et Q^2 faible : le modèle établi est très peu explicatif. Dans le cas d'une analyse PLS, cela signifie que, dans le domaine de variations des variables étudiées, les variables explicatives n'ont pas d'influence sur la valeur de la variable à expliquer.
- R^2 élevé et Q^2 faible : le modèle établi est très explicatif pour le jeu de données considérées. Cependant, lorsqu'une ou plusieurs observations sont exclues, la qualité du modèle décroît fortement. Ce modèle pourra difficilement être appliqué à un autre jeu de données.

De l'analyse multivariée vers la représentation univariée

Les algorithmes multivariés PLS permettent de déterminer des corrélations linéaires entre plusieurs paramètres. Nous verrons par la suite que le principal avantage de cette technique d'analyse est de tenir compte de l'ensemble des corrélations entre les paramètres. Dans les chapitres 2, 3 et 4, les résultats seront présentés sous forme de tableau récapitulant l'ensemble des corrélations entre les paramètres avec les statistiques R^2 et Q^2 associées. La validation physique de ces résultats s'appuiera sur des représentations univariées entre le paramètre à expliquer et le paramètre explicatif. L'objectif de cette représentation est de visualiser concrètement la relation entre les paramètres ainsi que son signe (l'aspect multivarié étant perdu avec ce type de graphique – voir paragraphe III.2.d). La Figure 20 présente deux exemples de corrélations univariées entre trois paramètres A, B & C.



**Figure 20. Exemple de corrélations univariées entre 2 paramètres.
Corrélation importante (a) et corrélation faible (b)**

La Figure 20-a représente une relation linéaire entre les paramètres A & B. Ce type de représentation nous renseigne sur le signe de la corrélation à savoir que le paramètre A décroît lorsque le paramètre B augmente. La qualité de la modélisation est bonne puisque 70% de la variabilité du paramètre A est expliquée par le paramètre B ($R^2=70\%$). La Figure 20-b montre une faible corrélation ($R^2=15\%$) positive entre les paramètres A et B. Même si la qualité de modélisation est faible, cette représentation permet de visualiser le type de relation entre les 2 paramètres.

III.2.c- Etat de l'art dans les autres industries

L'approche multivariée est utilisée depuis peu dans le domaine des semi-conducteurs. Néanmoins cette approche n'est pas nouvelle dans d'autres secteurs industriels comme la biologie ou la métallurgie. En effet, de nombreux domaines utilisent cette approche afin de mieux comprendre les origines des variations de leurs procédés. Le principal apport de cette technique par rapport aux autres est la possibilité de traiter des tableaux de données importants sans être affecté de façon significative par des données manquantes [SONG 2002], [KETTANEHA 2005]. Les principaux domaines d'applications sont présentés dans le Tableau 6 ci-dessous.

Domaine	Exemples d'applications	Références bibliographiques
Biologie	Etude ostéomyométrique du coxal et du fémur et les paramètres d'un animal (age, race, sexe, masse corporelle, ...)	[BETTI 2000]
	Evaluation des symptômes et de la fonction respiratoire en fonction des expositions de poussières de bois dans les ateliers de menuiserie	[MARCUCCELLI 1998]
	Etudes des relations entre la structure chimique et les propriétés biologiques des molécules (ex. : cartes chimiques, design moléculaire statistique, ...)	www.umetrics.fr
Chimie / Pharmaceutique	Calibration spectroscopique pour la détection de dérives d'équipements de production (ex. : analyse des mesures de granulométrie, d'humidité, de composition, etc. pour le calcul de grandeurs telles que la concentration ou le pH d'une solution).	www.umetrics.fr
	Signature multivariée du cheminement des produits pharmaceutiques (signature intégrant le numéro de l'équipement, les conditions environnementales, la qualité des réactifs, ...).	www.umetrics.fr
Pétrochimie	Contrôle multivarié en temps réel du fonctionnement des raffineries de pétrole (industrie fonctionnant 24h/24h & 7j/7j).	www.umetrics.fr
Papeterie	Utilisation des méthodes de projection pour le suivi de la qualité de la production.	[CHAMPAGNE 2002]
Métallurgie	Optimisation du fonctionnement d'une pompe thermomécanique pour des procédés de moulage	[ESLINGA 2002]
	Prédiction de la qualité des produits finaux à l'aide des mesures effectuées en production (granulométrie, ...).	www.umetrics.fr
Alimentaire	Identification et classification des principaux arômes de vins rouges en fonction de leurs caractéristiques.	[LOZANO 2005]
	Utilisation de l'approche multivariée pour synthétiser l'ensemble des mesures (principalement des mesures spectroscopiques) pour la détection et la classification des dérives.	www.umetrics.fr

Tableau 6. Exemples de domaines d'applications des algorithmes multivariés.

Dans tous les domaines précédemment cités, les analyses multivariées sont couramment utilisées afin de mieux comprendre les origines des variations de la qualité des produits. De telles approches commencent à être utilisées dans le domaine de la microélectronique notamment pour les études de comportement des variables temporelles [ALEGRET 2004 -1] ou statiques [ALEGRET 2004 -2] des équipements. Le principal objectif de ces analyses est d'améliorer le suivi des équipements en essayant de mieux comprendre leur comportement durant les procédés de fabrication.

III.2.d- Avantages et inconvénients des outils multivariés

Le nombre important de domaines d'utilisations des approches multivariées et plus particulièrement du logiciel Simca-P, provient des nombreux avantages induits par ce type de solution :

- La stabilité du modèle est assurée même dans le cas où le nombre de variables explicatives est supérieur au nombre d'observations. L'approximation linéaire est donnée par validation croisée ce qui confère en plus de la stabilité du modèle, un pouvoir prédictif élevé.
- Le traitement de données manquantes est pris en compte en utilisant les estimations données par l'algorithme NIPALS (Non linear Estimation by Iterative Partial Least Squares) : c'est un outil puissant en présence de données manquantes.
- L'aspect multivarié des analyses permet de prendre en compte l'ensemble des interactions entre les paramètres et de les quantifier. Cet avantage contribue à l'amélioration des modèles établis. La Figure 21 représente l'influence de 2 paramètres B et C sur la variabilité de A. Nous ferons l'hypothèse que les facteurs B et C sont indépendants¹¹.

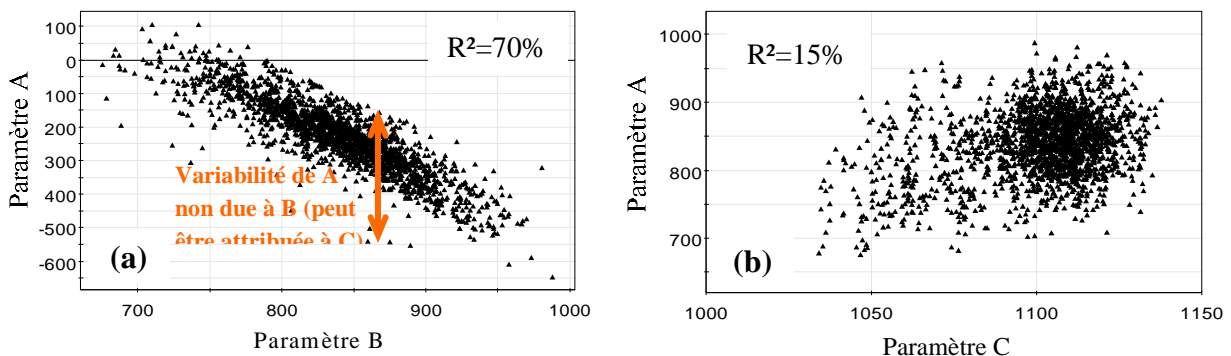


Figure 21. Modélisation multivariée et univariée.

Les corrélations univariées expliquent $70\% + 15\% = 85\%$ de la variabilité de A. Les modèles multivariés basés sur les mêmes données expliquent près de 90% de la variabilité de A car ils prennent en compte des interactions entre B et C.

¹¹ 2 facteurs indépendants n'auront aucune influence l'un sur l'autre.

Cependant, de part la nature des algorithmes statistiques employés pour réaliser ce type d'analyse, certains inconvénients existent :

- La distribution de chacune des variables étudiées doit répondre à une loi gaussienne. Les indicateurs de Skewness et de Kurtosis nous renseignent sur la normalité des distributions des variables. Comme nous l'avons vu dans le paragraphe II.2.b de ce chapitre, il est toutefois possible de transformer les données pour obtenir des distributions se rapprochant d'une loi gaussienne.
- Ce type d'algorithme ne modélise que des effets linéaires (ordre inférieur ou égal à 2).

Dans cette partie, nous avons vu que l'utilisation des analyses multivariées offre de nombreux avantages par rapport aux outils "standard" utilisés dans le domaine de la microélectronique. Nous retiendrons notamment que ces techniques, déjà fortement utilisées dans les autres secteurs industriels, semblent très adaptées au monde microélectronique et permettent d'effectuer des analyses robustes même si le nombre d'observations est faible et si des valeurs manquantes existent. Cependant, leur utilisation nécessite certaines précautions concernant la distribution des variables et se restreint à l'étude des phénomènes linéaires. Nous allons voir dans la partie suivante, comment les réseaux de neurones peuvent résoudre ces deux dernières lacunes.

III.3- Les outils basés sur les algorithmes d'apprentissage

Il est aujourd'hui impossible de parler d'analyse de données sans parler des réseaux de neurones [TUFFERY, 2005]. Ces méthodes se sont largement répandues grâce à leur puissance de modélisation qui permet d'approximer, moyennant une phase d'apprentissage, n'importe quelle fonction. Dans ce paragraphe, nous présenterons les méthodes d'apprentissage basées sur les réseaux de neurones formels. A la fin de cette partie, nous ferons une analogie entre ce type d'apprentissage et celui utilisé par la société MASA pour réaliser l'extrapolation de surface.

Après la notion de neurone formel de Mc Culloch et Pitts en 1943, les réseaux de neurones sont apparus en 1958 avec le perceptron de Rosenhalt. Cette approche a suscité l'intérêt de nombreuses personnes dans les années 80 et s'est déployé dans l'industrie dès les années 90.

III.3.a- Les réseaux de neurones mathématiques : analogie avec la biologie

Le neurone mathématique

L'élément fonctionnel de base du Système Nerveux est le neurone (Figure 22).

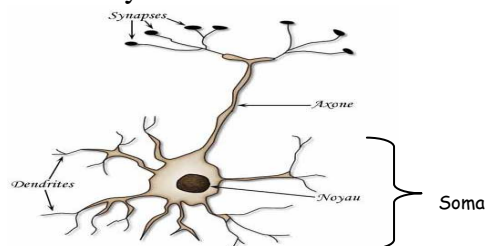


Figure 22. Représentation d'un neurone biologique.

Il est principalement constitué de trois parties appelées dendrites, soma et axone. Ces parties ont un rôle fonctionnel bien défini vis-à-vis des transferts d'informations. Les dendrites reçoivent l'information au niveau des points de contact avec les autres neurones (ou synapses). L'information est ensuite acheminée vers le corps cellulaire ou soma. Le neurone biologique émet un signal en fonction des signaux qui lui proviennent des autres neurones. On observe au niveau du neurone, une intégration des signaux reçus au cours du temps, c'est à dire une sorte de sommations des signaux. Quand cette somme dépasse un certain seuil, le neurone émet à son tour un signal électrique.

Un neurone formel (en statistique) est une fonction algébrique paramétrée, non linéaire en ses paramètres, à valeurs bornées [DREYFUS 2002]. Un neurone artificiel effectue une somme pondérée de ses valeurs d'entrée. Si la valeur seuil est atteinte, une fonction de transfert est appliquée à cette somme des entrées pour obtenir une valeur de sortie. C'est là l'origine de l'analogie entre neurone biologique et neurone formel (ou artificiel). Le neurone mathématique, calqué sur le neurone biologique, est modélisé par deux opérateurs (Figure 23) :

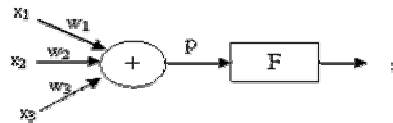


Figure 23. Modèle mathématique d'un neurone.

- Un opérateur de sommation qui élabore un potentiel p égal à la somme pondérée (w_i) des entrées x_i de la cellule : $p = \sum_i w_i \cdot x_i$,
- Un opérateur qui calcule l'état de la sortie s du neurone en fonction de son potentiel p : $s = F(p)$ ou F est la fonction d'activation du neurone.

Dans la pratique, cette fonction F est souvent de type sigmoïde dont la forme générale est celle d'une tangente hyperbolique avec des valeurs comprises entre -1 et +1. De part sa nature, ce type de fonctions est très approprié pour estimer les fonctions de densités de paramètres. La pente à l'origine dépend du paramètre T et augmente si T tend vers 0.

$$F(p) = \frac{\exp\left(\frac{p-\theta}{T}\right) - 1}{\exp\left(\frac{p-\theta}{T}\right) + 1}$$

θ et T sont des paramètres fixes de la fonction

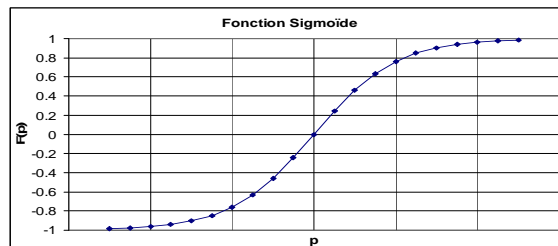


Figure 24. La fonction Sigmoïde.

Du neurone au réseau de neurones

Un réseau de neurones "mathématiques" a une architecture qui est calquée sur celle du cerveau (100 milliards de neurones sont présents dans le cerveau). Un réseau de neurones mathématique est composé de plusieurs neurones organisés en plusieurs couches : 1 couche de neurones d'entrée, 1 couche de neurone de sortie et x couches de neurones intermédiaires que l'on appellera couches cachées. Dans cette succession de couches, on peut définir un sens préférentiel du transfert de l'information (par défaut de la gauche vers la droite). Suivant le type d'agencement des neurones entre eux, il existe dans la littérature plusieurs organisations possibles de ces réseaux : On distingue les réseaux à connexions directes, récurrentes, totales entre 2 couches et locales [JUTTEN 2004].

La Figure 25 présente un exemple de réseau de neurones à connexion totale à 3 entrées, 1 sortie et 1 couche intermédiaire. Le nombre de couches intermédiaires et le nombre de neurones par couche sont fixés par l'utilisateur. Dans ce manuscrit, nous nous placerons uniquement dans le cas d'apprentissages supervisés : l'objectif est, à partir d'un jeu de données (comprenant X_1 , X_2 , X_3 et S), d'ajuster les poids de chaque neurone afin d'approximer le plus correctement possible la sortie S .

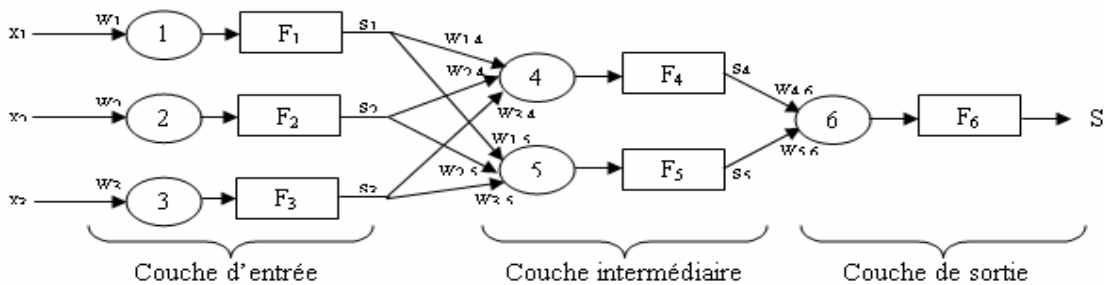


Figure 25. Réseau de neurones à connexion totale à trois entrées (1, 2 et 3), 1 sortie (6) et 1 couche intermédiaire de 2 neurones (4, et 5).

Ainsi les sorties de chacun des neurones s'expriment de la façon suivante :

$$s_1 = F_1(x_1, w_1) \quad s_2 = F_2(x_2, w_2) \quad s_3 = F_3(x_3, w_3)$$

$$s_4 = F_4(s_1 \cdot w_{1,4} + s_2 \cdot w_{2,4} + s_3 \cdot w_{3,4}) \quad s_5 = F_5(s_1 \cdot w_{1,5} + s_2 \cdot w_{2,5} + s_3 \cdot w_{3,5}) \quad s_6 = F_6(s_4 \cdot w_{4,6} + s_5 \cdot w_{5,6})$$

Chaque type de réseau de neurones comporte un système d'équations décrivant sa dynamique par rapport aux signaux d'entrées et un autre système d'équations, de forme différentielle, décrivant la manière dont il apprend. Il faut toutefois garder à l'esprit que le modèle biologique dont nous nous sommes inspiré est extrêmement simplifié par rapport à la réalité.

D'après le théorème de Hornik-Stinchcombe-White (1989), un tel outil composé d'une couche d'entrée, d'au moins une couche cachée et d'une couche de sortie est un approximateur universel de fonction quelconque. Ceci signifie premièrement, qu'il est possible d'approcher aussi près que possible toute fonction continue, avec une seule couche cachée, pour peu que le

nombre d'unités cachées soit suffisamment grand ; deuxièmement, l'approximation obtenue par réseau de neurones demande moins de régresseurs pour une même précision que n'importe quel autre approximateur non linéaire.

Il existe principalement deux types de modèles de réseaux de neurones à apprentissage supervisé :

- Le perceptron multicouches. Ce modèle est particulièrement bien adapté pour estimer des fonctions complexes et non linéaires. Comme son nom l'indique, ce réseau se décompose en plusieurs couches et chaque nœud d'un niveau est connecté à l'ensemble des nœuds du niveau précédent. Le logiciel Neuro-one, développé par la société Nétral, propose ce type d'approche [KIENER 2005].
- Le réseau à fonction radiale de base (RBF). Ce type de modèle ne travaille qu'avec une seule couche cachée et utilise pour calculer la valeur de chaque nœud de la couche cachée pour une observation, non pas la somme des valeurs pondérées des nœuds du niveau précédent, mais la distance séparant dans l'espace cette observation du centre du nœud. Contrairement aux poids d'un perceptron multicouches, les centres de la couche cachée d'un réseau RBF ne sont pas ajustés à chaque itération au cours de l'apprentissage. Dans un perceptron, la modification d'un poids synaptique force à réévaluer tous les autres, au contraire d'un réseau RBF où les neurones se partagent l'espace et sont quasi indépendants les uns des autres.

Nous décrivons dans la suite de ce manuscrit des cas d'applications de modélisation basés sur les réseaux de neurones.

La technique utilisée par la société MASA pour l'extrapolation de surface est guidée par la même philosophie que celle de l'apprentissage supervisé par réseaux de neurones. Dans ce cas, nous ne cherchons pas à estimer les poids des neurones appartenant à un réseau mais les coefficients d'une fonction de type RBF.

Remarque importante : attention au sur apprentissage !

Lorsqu'une liaison entre la variable cible et une variable explicative apparaît dans l'échantillon d'apprentissage et se trouve de ce fait mémorisée dans le modèle, alors qu'elle n'existe pas dans la population entière, on parle de sur apprentissage. Ce cas apparaît souvent lorsque le nombre d'observations défini pour l'apprentissage devient trop petit par rapport au nombre de paramètres du modèle. Le sur apprentissage se traduit par le fait que l'estimation de la fonction en vient à épouser toutes les fluctuations de l'échantillon d'apprentissage. Une des manières d'éviter ce sur apprentissage est de diminuer le nombre de neurones présents dans les couches cachées afin de diminuer le nombre de paramètres du modèle.

La Figure 26 présente plusieurs exemples d'ajustements d'une fonction de type exponentielle :

- Le modèle établi est trop simple pour estimer correctement la fonction (a),
- Le modèle estime bien la fonction (b),
- Le modèle est trop complexe (c) : cas de sur apprentissage.

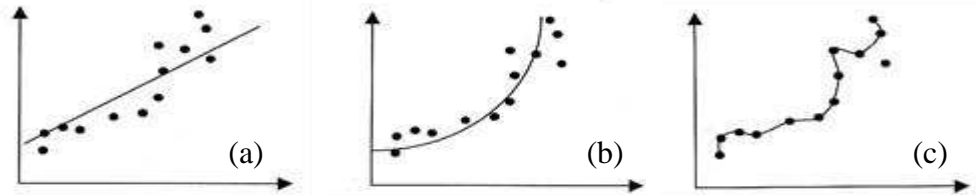


Figure 26. Exemples d'estimation d'une fonction.

Nous verrons qu'une grande partie de l'intérêt des réseaux de neurones réside dans l'utilisation de fonctions non linéaires de type sigmoïde. Ces fonctions permettent de modéliser les variations non linéaires entre les paramètres électriques (tensions de seuil, courant de fuite, ...) avec les paramètres physiques (épaisseurs, dimensions critiques, ...). Ainsi, à l'aide de ces concepts, nous verrons qu'il est possible d'analyser toute une classe de problèmes complexes qu'il aurait été difficile d'imaginer par des approches plus classiques.

III.3.b- Les réseaux de neurones formels : application à la modélisation de phénomènes physiques

Dans le domaine microélectronique le cas de non linéarité apparaît souvent notamment lorsque l'on cherche à modéliser les principales caractéristiques du transistor (courants de fuite, les tensions de seuil, ...) dans des domaines de variations importants. L'équation ci dessous définit l'évolution du courant de drain en fonction des dimensions du transistor :

$$I_D = \mu_n \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon_{OX}}{Th_{OX}} \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[V_G - V_{TH} - (1 + \delta) \frac{V_D}{2} \right] V_D$$

Avec :

- | | |
|--|--|
| μ_n : Mobilité effective des porteurs (électrons) sous champ électrique transversal non nul, | V_{TH} : Tension de seuil du transistor, |
| ϵ_0 : Constante diélectrique du vide, | V_G : Tension appliquée à la grille, |
| ϵ_{OX} : Constante diélectrique de l'oxyde de grille, | V_D : Tension appliquée au drain. |
| δ : Facteur d'effet du substrat, | |
| Th_{OX} : Epaisseur de l'oxyde de grille, | |
| W : Largeur du transistor, | |
| L : Longueur du transistor, | |

Ainsi, lorsque le domaine de variations de l'épaisseur d'oxyde de grille devient suffisamment important, il n'est plus possible d'approximer que le courant traversant le drain varie linéairement avec ce paramètre. L'utilisation des réseaux de neurones dans le domaine des semi-conducteurs s'est développé il y a seulement une dizaine d'années. Les études neuronales menées principalement dans le domaine de la recherche avaient pour objectif de modéliser le comportement des équipements plasma [HIMMEL 1993], [BYUNGWHAN 1994], [MAY 1994]. Depuis quelques années, des approches basées sur les techniques neuronales sont développées afin de mieux contrôler les procédés [CARD 2002].

III.3.c- Etat de l'art dans les autres industries

Les méthodes d'analyses basées sur l'utilisation des réseaux de neurones commencent à se déployer dans les unités de fabrication de semi-conducteurs mais sont utilisées depuis une dizaine d'année dans le domaine de la recherche pour la modélisation des équipements de fabrication. Ces techniques sont aussi couramment utilisées dans d'autres secteurs industriels. Les modélisations devant être très précises dans de nombreux domaines, cette approche est souvent utilisée pour modéliser des comportements non linéaires. Le Tableau 7 montre que les réseaux de neurones sont utilisés dans des domaines divers et variés tels que la chimie, le marketing ou le traitement du signal.

Domaine	Exemple d'application	Référence Bibliographique
Microélectronique	Modélisation du comportement de procédés plasma	[BULSARI 2004] [HONG 2003]
Métallurgie	Amélioration des procédés de fabrication de laminage de métaux	[CSER 2001]
Conception de fibres optiques	Quantification de l'effet des variables des équipements de fabrication des fibres optiques sur les propriétés des fibres optiques.	[BULSARI 2002]
Chimie	Suivi et contrôle des procédés de distillation	[BO 2003]
	Application des réseaux de neurones artificiels a la détermination des constantes cinétiques des réactions COV+OH en phase aqueuse	[RUDE 2004] [LASSERON 2001]
Marketing	Prédiction de la fréquentation des rayons par les consommateurs en fonction de leur santé économique	www.afc-cca.com
Traitement du Signal	Compression d'images	[FOUCHER 2002]
Mécanique	Réduction de modèles et optimisation de systèmes thermomécaniques	[WEIL 2002]

Tableau 7. Exemples de domaines d'application des réseaux de neurones.

Ce type d'approche commence ainsi à voir le jour dans le domaine de la microélectronique du fait de ses nombreux avantages [DREYFUS 2002]. Le paragraphe suivant décrit plus précisément les principaux apports de ce type d'approche.

III.4.d- Avantages et inconvénients connus des réseaux de neurones formels

Du fait de la grande souplesse des réseaux de neurones, les principaux avantages de l'utilisation de réseaux de neurones sont :

- La possibilité d'approximer n'importe quel type de fonction avec une très grande fiabilité de modélisation. Nous noterons que plus la fonction à estimer sera complexe, plus le nombre de couches cachées et de neurones seront important : attention au sur apprentissage,
- La grande précision de modélisation même si le nombre d'observations devient très faible devant le nombre de variables,
- De pouvoir traiter des données ne suivant pas forcément à une loi Gaussienne. En effet la technique des réseaux de neurones se base sur une approche non paramétrique,
- Dans le cas des analyses prédictives, le perceptron multicouches est moins sensible aux valeurs défectueuses que les régressions linéaires ou logistiques simples. Si une variable d'entrée est trop bruitée, le nœud correspondant verra son poids w_i diminuer jusqu'à zéro.

Cependant, de part la nature des algorithmes statistiques employés pour réaliser ce type d'analyse, l'utilisation des réseaux de neurones présente plusieurs inconvénients :

- Si le nombre de couches cachées et surtout de neurones présents dans ces couches cachées devient trop important, il devient difficile d'extraire, de l'ensemble de toutes les variables potentielles, le sous-ensemble des variables les plus pertinentes. Dans ce cas, il n'est pas facile de simplifier le modèle,
- La convergence vers la meilleure solution globale n'est pas toujours assurée. En effet, un réseau considère qu'il a trouvé une bonne solution lorsque la fonction erreur, qui est à minimiser par l'ajustement des poids, rencontre un minimum et ne diminue plus lorsque les poids continuent d'être ajustés : ce minimum peut être simplement local et non global,
- Toute construction de modèle passe par une phase d'apprentissage qui dépend du nombre d'observations et de variables présentes dans le tableau et du nombre de neurones défini par le réseau,
- Nous avons vu que si le nombre d'observations devient trop faible devant le nombre de neurones, des cas de sur apprentissage peuvent se produire,
- L'utilisation de ce type d'approche nécessite de régler de nombreux paramètres comme le nombre de couches cachées et le nombre de neurones par couche cachée,
- Impossibilité de traiter un trop grand nombre de variables.

Dans ce paragraphe, nous avons constaté que même si l'utilisation des réseaux de neurones implique de nombreux avantages, les analyses requièrent certaines précautions. Notamment, dans la suite de ce manuscrit, nous veillerons à ce que le nombre de neurones dans les couches cachées ne devienne pas trop important afin :

- De ne pas rentrer dans des cas de sur apprentissage,
- D'obtenir des résultats les plus explicites possibles et ainsi pouvoir valider physiquement les relations obtenues.

IV- Méthodologie de corrélation entre les mesures électriques et physiques et les paramètres des équipements

Dans l'introduction de ce manuscrit, nous avons rapidement montré le lien entre les différentes mesures effectuées au sein d'une ligne de production de semi-conducteurs. Dans ce chapitre, nous avons présenté les pré-requis nécessaires à l'analyse de données en terme d'environnement et d'outils d'analyses. Des outils statistiques novateurs dans le monde microélectronique ont notamment été décrits. Dans ce paragraphe, nous proposons, basés sur les outils précédemment détaillés, une méthodologie d'analyse des relations entre les mesures électriques et physiques et les paramètres des équipements de fabrication.

IV.1- Recherche des corrélations entre les données physiques et électriques et les paramètres des équipements – Caractérisation des variances électrique et physique

Les principaux contrôles effectués lors de la fabrication des transistors sont réalisés sur les mesures physiques (contrôles SPC et Run to Run). La méthodologie proposée consiste à caractériser la nature ainsi que la cause de la variabilité de chaque opération de fabrication et son influence sur les performances des circuits intégrés. Elle comporte principalement trois étapes qui consistent :

- Premièrement, à caractériser la variabilité des mesures physiques. Cette variance pouvant provenir directement de l'étape associée à la mesure mais également d'opérations de fabrication précédentes,
- Deuxièmement, à quantifier l'impact de ces variations sur les performances électriques des transistors,
- Finalement, à comprendre l'origine de la variance des mesures physiques en la corrélant aux variations des paramètres des équipements collectés pendant les procédés de fabrication.

En fonction des relations entre les variables (linéaires ou non), la quantification de ces corrélations est réalisée en employant les algorithmes multivariés ou neuronaux.

La Figure 27 présente le déroulement de la méthodologie développée suivant les trois points précédemment décrits.

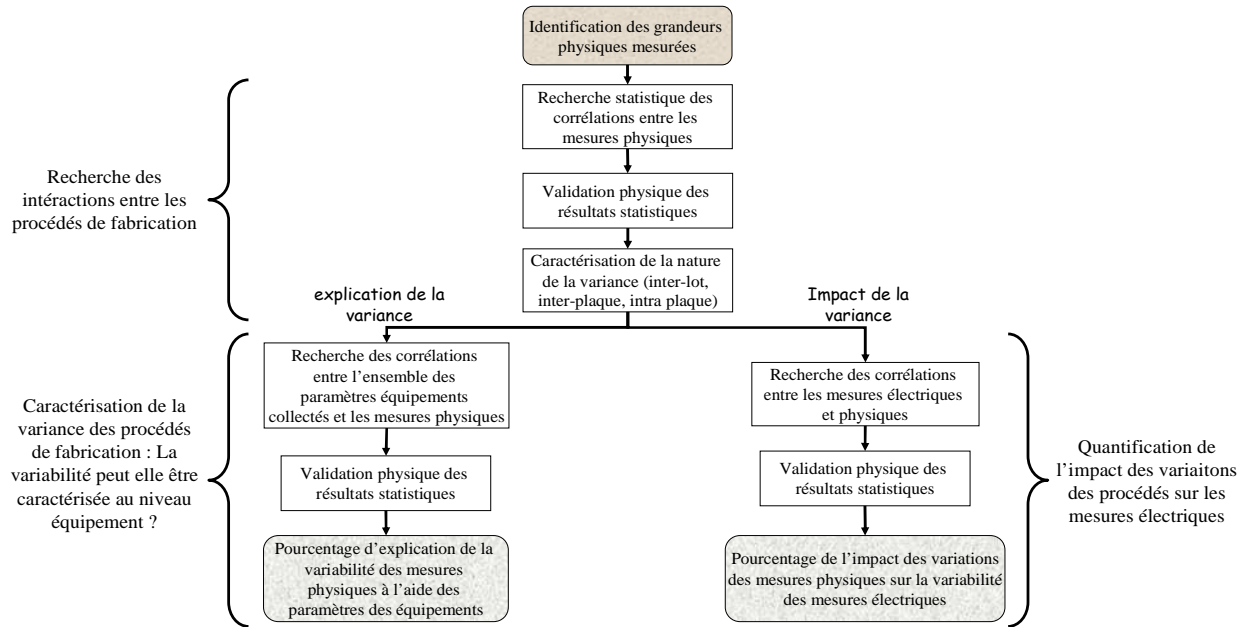


Figure 27. Déroulement de la recherche de corrélation entre les mesures électriques & physiques et les paramètres des équipements.

La quantification des interactions entre les mesures physiques et des corrélations entre ces mesures et les données des équipements permet de comprendre globalement l'origine des variations des procédés de fabrication (variabilité provenant de l'opération associée à la mesure ou d'étapes antérieures).

Les corrélations déduites des analyses entre les mesures physiques et électriques permettent d'évaluer l'impact de la variabilité des équipements sur les caractéristiques électriques des transistors.

IV.2- Méthodes de réduction de la variabilité des procédés

La recherche des corrélations présentée dans le paragraphe précédent permet de comprendre les relations entre les différentes mesures effectuées dans la ligne de production. La caractérisation globale de la variance de ces mesures offre la possibilité de définir les opérations de fabrication à optimiser pour améliorer le fonctionnement des circuits électriques.

Dans les paragraphes suivants, nous utiliserons la notion de "Capabilité des procédés" (ou Cpk) pour analyser la variabilité des procédés et des mesures électriques en regard des spécifications associées. Le Cpk est défini par [MONTGOMERY 2001]:

$$Cpk = k * Cp \text{ avec : } - Cp = \frac{\text{Limite de specification haute} - \text{Limite de specification basse}}{6.\sigma_{Total}}$$

Avec σ^2_{Total} : variance totale du système,

k : coefficient caractérisant le centrage de la distribution par rapport aux spécifications.

Le choix du paramètre électrique ou physique à optimiser doit reposer sur l'analyse de l'indicateur Cpk. Un Cpk faible caractérisant une variance importante par rapport aux spécifications. La Figure 28 expose la méthode développée permettant de définir quel type d'action doit être mise en œuvre pour réduire la variabilité d'un paramètre électrique ou d'un procédé de fabrication.

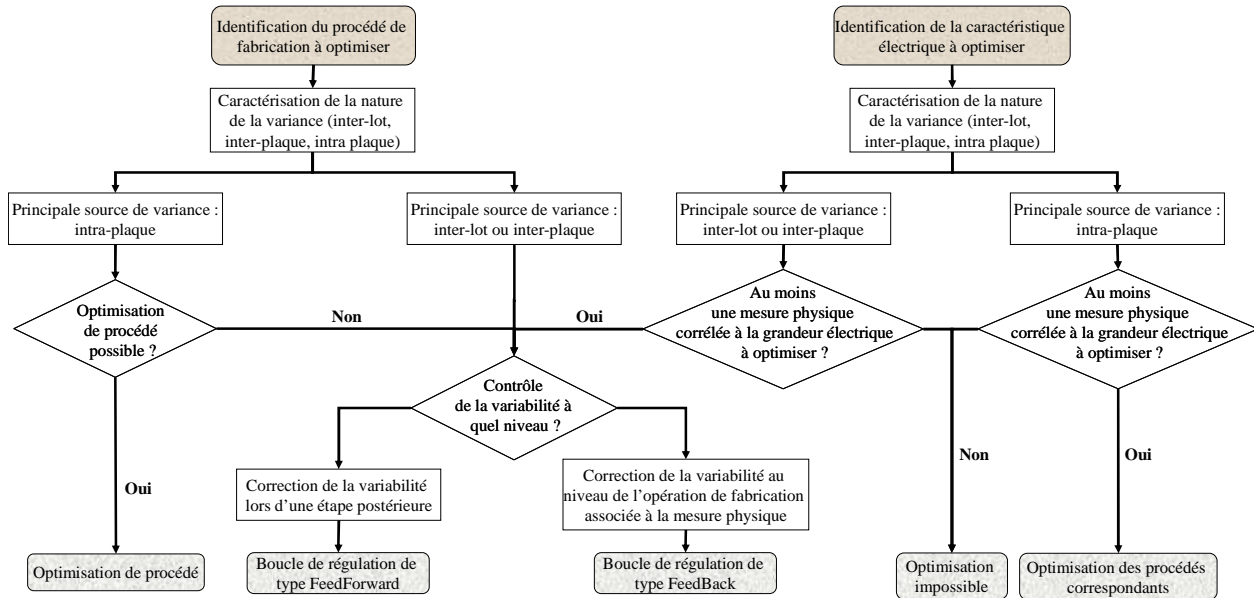


Figure 28. Méthode de réduction de la variance basée sur l'analyse de données.

La méthodologie de réduction de variance proposée se base directement sur l'origine et la nature de la variabilité des mesures et non pas uniquement sur le savoir faire des ingénieurs. Grâce à cette méthodologie, les actions proposées attaquent directement la source de la variabilité en optimisant le procédé correspondant ou en implémentant des boucles de régulation adaptées. Le gain en terme de performances électriques des circuits élaborés est également clairement quantifié. La variance des procédés ainsi caractérisée et réduite, il reste à contrôler cette variabilité en optimisant le plan de contrôle des procédés de fabrications.

IV.3- Optimisation du plan de contrôle des procédés de fabrication – Contrôle de la variance

L'optimisation du plan de contrôle peut être effectuée soit à partir des limites de spécification associées aux paramètres électriques soit à partir des limites associées aux paramètres physiques. L'objectif de cette optimisation consiste, en se basant sur les modèles de variation établis, à répercuter les spécifications des limites électriques ou physiques jusqu'au niveau des paramètres des équipements. Cette répercussion des limites permet une détection plus rapide des dérives des équipements. La Figure 29 détaille la méthode proposée.

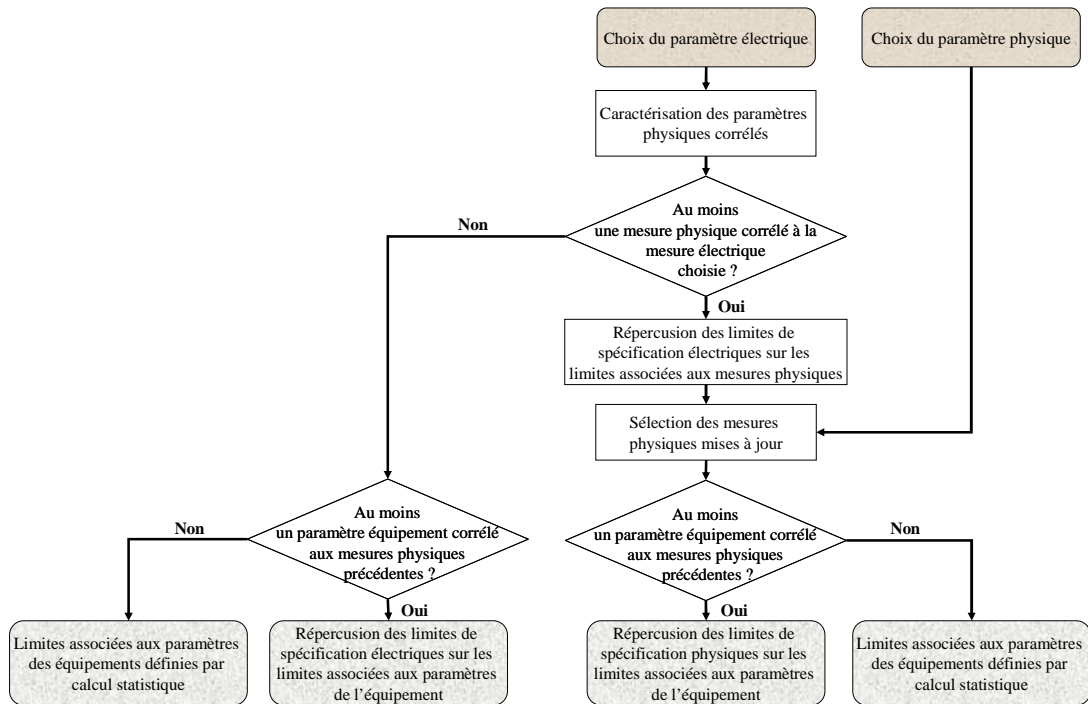


Figure 29. Méthode de calcul des limites de spécification basée sur les corrélations entre les paramètres.

L'objectif de la méthode proposée consiste à assurer la cohérence entre les mesures effectuées (électriques, physiques et FDC) au sein de la ligne de production. Les algorithmes multivariés permettant de considérer l'ensemble des corrélations entre les variables étudiées, les limites proposées à partir de cette méthode caractérisent l'ensemble des interactions entre les différentes mesures.

En fonction de l'explicativité des paramètres FDC collectés, les limites associées sont soit calculées à partir des relations entre les paramètres équipements et les mesures physiques et/ou électriques, soient définies statistiquement en se basant sur leur variabilité naturelle.

V- Conclusion

Tout d'abord, la première partie de ce chapitre a montré l'importance de l'environnement pour l'analyse de données. Les problématiques de collecte, de centralisation et de prétraitement des données ont été identifiées. Le développement de nouvelles approches basées sur des algorithmes apprenants de type fonctions radiales de bases apparaît comme une alternative afin de caractériser les relations au niveau site entre des mesures effectuées à partir de profils de mesure différents. Cette méthodologie permet ainsi de prendre en compte l'ensemble de la variabilité des mesures effectuées (variabilités inter-lot, inter-plaque et intra-plaque).

Deuxièmement, la mise en regard des problématiques de l'analyse de données dans le domaine de la microélectronique avec les algorithmes d'analyses proposés par les statisticiens a permis d'identifier les manques du site de Crolles 2. Cet état de l'art a souligné la valeur ajoutée des algorithmes multivariés (ACP et PLS) et neuronaux pour combler ces lacunes. Les avantages

ainsi que les inconvénients de ces outils montrent l'intérêt de tels algorithmes pour répondre aux problématiques rencontrées.

Finalement, la dernière partie de ce chapitre a exposée la méthodologie développée durant ces travaux. Cette méthodologie vise, en quantifiant les relations entre les mesures électriques et physiques et les paramètres des équipements, à caractériser la nature ainsi que l'origine de la variance des performances des circuits. Cette caractérisation permet, dans un second temps, de proposer des actions de réduction de la variance des mesures électriques ciblées sur les origines réelles de la variabilité mesurée et non pas sur des a priori. La quantification des liens entre les différentes mesures électriques, physiques et FDC, permet ensuite d'optimiser le plan de contrôle de chacune de ces mesures à l'aide des modèles statistiques obtenus.

Bibliographie

- [ALEGRET 2003], ALEGRET Cyril, Développement de méthodes de corrélation entre les données électriques, les mesures de métrologie et les paramètres des équipements, Rapport de DEA, Ecole doctorale EEATS option MNE, 2003
- [ALEGRET 2004 -1], ALEGRET Cyril, FORTUIN Arnoud, PASQUALINI François, First Wafer Analysis on a 90nm Gate Etch Process, 7TH Meeting Of CREMSI Fuveau, December 2004
- [ALEGRET 2004 -2], ALEGRET Cyril, BIHARE Cyril, DEL-MEDICO Sylvie, PASQUALINI François, Chamber Matching on a Gate Etch Equipment, 7TH Meeting Of CREMSI Fuveau, December 2004
- [ALEGRET 2005], ALEGRET Cyril, PASQUALINI François, FERNANDEZ Rodrigo, Implementation of Machine Learning for metrology applications in front-end manufacturing: spatial profile estimation and outlier profile detection, International SEMATECH Manufacturing Initiative Symposium, October 2005
- [BASTIEN 2005], BASTIEN Philippe, VINZIB Vincenzo Esposito, TENENHAUS Michel, PLS generalised linear regression, Computational Statistics & Data Analysis Vol.48 p.17-46, 2005
- [BERGERET 2004], BERGERET François, De la statistique dans l'industrie : Un Exemple à Freescale, Journal de la Société Française de Statistique, Volume 145, N°1, p.71-95, 2004
- [BETTI 2000], BETTI Eric, Statistiques uni- et multivariées appliquées à la biologie : étude ostéomyométrique du coxal et du fémur chez le chien, Revue Médical Vétérinaire, Vol. 151, N°4, p.317-336, 2000
- [BO 2003], BO C.M., The Application of Neural Network Soft Sensor Technology to an Advanced Control System of Distillation Operation, IEEE, p.1054-1058, 2003
- [BUCLON 2005], BUCLON Hervé, ALEGRET Cyril, VAN HERK Joost, Multivariate algorithms for Fault Detection and Classification improvements: From engineering analysis to manufacturing, 6th European AEC/APC Conference 2005 Dublin, April 2005
- [BULSARI 2004], BULSARI A., Nonlinear models used to address epi layer uniformity, Solid State Technology, p.33-36, July 2004
- [BULSARI 2002], BULSARI A., Optimizing OFC Secondary Coatings - Use of Nonlinear Models Simplified, Wire & Cable Technology International, p.44-46, September 2002
- [BYUNGWHAN 1994], BYUNGWHAN Kim, An Optimal Neural Network Process Model for Plasma Etching, IEEE Transactions on semiconductor manufacturing, VOL.7, N°1, February 1994
- [CARD 2002], CARD Jill, Using neural networks for intelligent plasma etch process control, Solid State Technology, p.33-36, November 2002

[CHAMPAGNE 2002], CHAMPAGNE Marc, IVANOV Isabelle, Multigrade Modelling – Paperboard quality modelling, Proceedings of the American Control Conference, Anchorage, May 2002

[CSER 2001], CSER L., Different Kinds of Neural Networks in Control and Monitoring of Hot Rolling Mill, IEA/AIE, p.791-796, 2001

[DREYFUS 2002], DREYFUS G., Réseaux de neurones Méthodologie et applications, Editions Eyrolles, ISBN 2-212-11019-7, 2002

[ERIKSSON 2001], ERIKSSON L., Multi- and Megavariate Data Analysis Principles and Applications, Umetrics, ISBN 91-973730-1-X, 2001

[ESLINGA 2002], ESLINGA Mike, TMP optimization using multivariate analysis, IEEE, ISBN 0-7803-7446-0, 2002

[FARON 2004], FARON Kamyar, Multivariable versus univariable APC, Proc. Of SPIE, Vol.5378, p.18-26, 2004

[FOUCHER 2002], FOUCHER C., Analyse et amélioration d'algorithmes neuronaux et non neuronaux de quantification vectorielle pour la compression d'images, Thèse de doctorat, 18 décembre 2002

[HIMMEL 1993], HIMMEL Christopher, Advantages of plasma Etch Modeling Using Neural Networks Over Statistical Techniques, IEEE Transactions on semiconductor manufacturing, VOL.6, N°2, May 1993

[HONG 2003], HONG Sang Jeen, Neural Networks Modelling of Reactive Ion Etching Using Optical Emission Spectroscopy Data, IEEE Transaction on semiconductors manufacturing, Vol.16, N°4, p.598-608, November 2003

[JACKSON 1991], JACKSON J., A User's Guide to Principal Component, John Wiley & Sons Inc., 1991.

[JUTTEN 2004], JUTTEN Christian, Les réseaux de neurones, Cours de Doctorat, Ecole EEATS, 2004

[KIENER 2005], KIENER Patrice, Neural Network to model laws of probability, ST Internal report, 2005

[KETTANEHA 2005], KETTANEHA Nouna, BERGLUNDB Anders, WOLDB Svante, PCA and PLS with very large Data sets, Computational Statistics & Data Analysis, Vol.48, p.69-85, 2005

[KUSIAK 2001], KUSIAK Andrew, Rough Set Theory: A Data Mining Tool for Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing, Vol.24, N°1, 2001

[LASSERON 2001], LASSERON Laurent, Modélisation des variations basse fréquence des émissions d'isoprène à l'aide d'un réseau de neurones artificiels, DEA Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques, 2001

- [LOZANO 2005], LOZANO Jesus, SANTOS José Pedro, HORILLO Carmen, Identification of typical aromas of red vines with thin film sensors combined with pattern recognition techniques, IEEE, ISBN 0-7803-8810-0, 2005
- [MARCUCILLI 1998], MARCUCILLI A., Evaluation des symptômes et de la fonction respiratoire en fonction des expositions de poussières de bois dans les ateliers de menuiserie, cours à l'université de Paris V, 1998
- [MAY 1994], MAY Gary S., Manufacturing Ics the neural way, IEEE spectrum, p.47-51, September 1994
- [NERUDA 2005], NERUDA Roman, KUDOVA Petra, Learning methods for radial basis function networks, Future Generation Computer Systems, Vol. 21, p.1131-1142, July 2005
- [PELISSIER 2004], PELISSIER Arthur, Développement de méthodes pour garantir la qualité des mesures, rapport interne ST Microelectronics, 2004).
- [ROUSSOS 2005], ROUSSOS George, Baxter Brad J.C., Rapid evaluation of radial basis functions, Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 180, p.51-701, August 2005
- [RUDE 2004], RUDE Julien, Application des réseaux de neurones artificiels a la détermination des constantes cinétiques des réactions COV + OH en phase aqueuse, DEA Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques, 2004
- [SAPORTA 2004], SAPORTA Gilbert, Data Mining: Une nouvelle façon de faire de la statistique, Cours, 2004
- [SONG 2002], SONG Kyuchul, Partial Least Square-based model predictive control for large-scale manufacturing processes, IIE Transactions, Vol. 34, p.881-890, 2002
- [TENENHAUS 1998], TENENHAUS M., La régression PLS théorie et pratique, Editions Technip, 1998
- [TUFFERY 2005], TUFFERY Stéphane, Data Mining et statistique décisionnelle, Editions Technip, ISBN 2-7108-0867-6, 2005
- [UMETRICS 2005], UMETRICS, Simca-P User Guide and Tutorial, Société Umetrics, 2005
- [WEIL 2002], WEIL Pascal, Rapport d'activité du LIPSI Laboratoire en ingénierie des processus et des services industriels, Ecole Supérieure des Technologies Industrielles Avancées, 2002
- [WOLD 1987], WOLD S., GELADI P., ESBENSEN K., ÖHMAN J., Multiway Principal Components- and PLS- Analysis. Journal of Chemometrics, 1, p.41-56, 1987
- [YE 2000], YE Nong, Hotelling's T² Multivariate Profiling for Anomaly Detection, Proceedings of the 2000 IEEE, 2000

Chapitre 2

Recherche des corrélations entre les mesures électriques et physiques et les paramètres des équipements pour les opérations d'isolation des transistors pour la technologie 90nm

Modélisation du Step Height

I-	Introduction	63
II-	Modélisation des interactions entre les procédés de la brique STI	67
III-	Modélisation de l'influence des variations des mesures physiques du module STI sur les principales caractéristiques électriques	79
IV-	Modélisation des étapes élémentaires de la brique de procédés STI	90
V-	Conclusion	110

Chapitre 2 : Recherche des corrélations entre les mesures électriques et physiques et les paramètres des équipements pour les opérations d'isolation des transistors pour la technologie 90nm

Le chapitre 2 présente l'application des méthodes d'analyses de données développées à la modélisation des variations des mesures électriques, physiques ainsi qu'à celles des paramètres des équipements utilisés pour l'élaboration de l'isolation entre les transistors. Après une courte introduction exposant le contexte d'étude et les problématiques liées aux contrôles de ces procédés, nous exposerons notre méthodologie et les résultats des analyses de corrélations. Nous montrerons finalement comment ces méthodes permettent de définir les voies d'améliorations pour la réduction de la variabilité des procédés et l'optimisation des plans de contrôle des équipements en jeu.

I- Introduction

Les conditions expérimentales dans lesquelles l'isolation entre les transistors est réalisée influent grandement sur les performances électriques des circuits. En effet, pour garantir le fonctionnement des circuits, chaque transistor ne doit pas être influencé par le comportement de ces voisins. Chaque zone active est ainsi séparée par une tranchée d'isolation (Shallow Trench Isolation – STI).

Pour la technologie 90nm, le module d'isolation¹² est constitué de 12 étapes de fabrication. Chacun des procédés utilisés est contrôlé par une ou deux opérations de métrologie (Figure 30).

¹² Ensemble de étapes effectuées pour l'élaboration de l'isolation entre les transistors. Nous emploierons aussi le terme STI pour désigner cet enchaînement d'opérations.

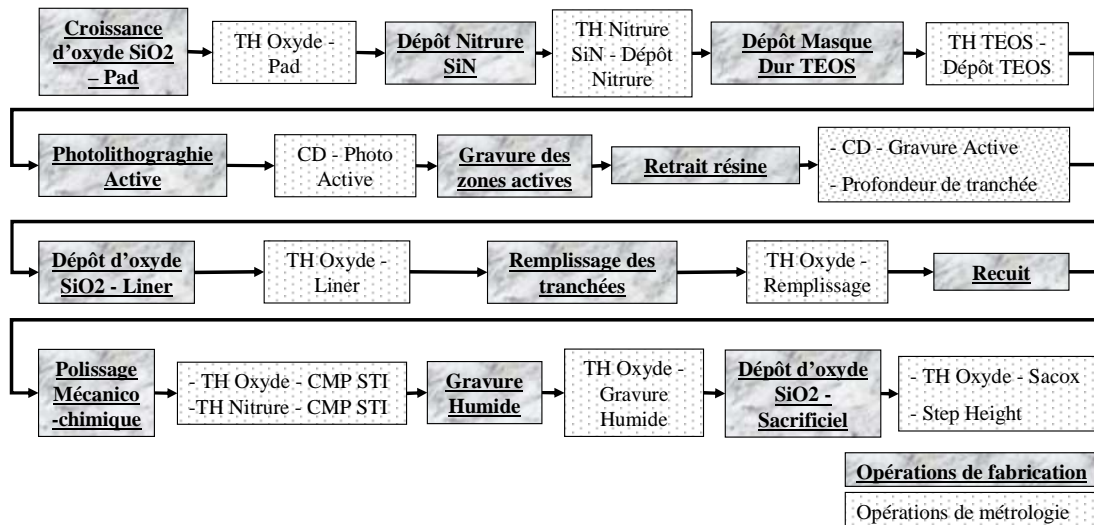


Figure 30. Enchaînement des opérations de fabrication du module d'isolation
TH représente une épaisseur (THickness) et CD une dimension de motif.

La Figure 31 décrit plus précisément les différentes mesures effectuées dans le module d'isolation.

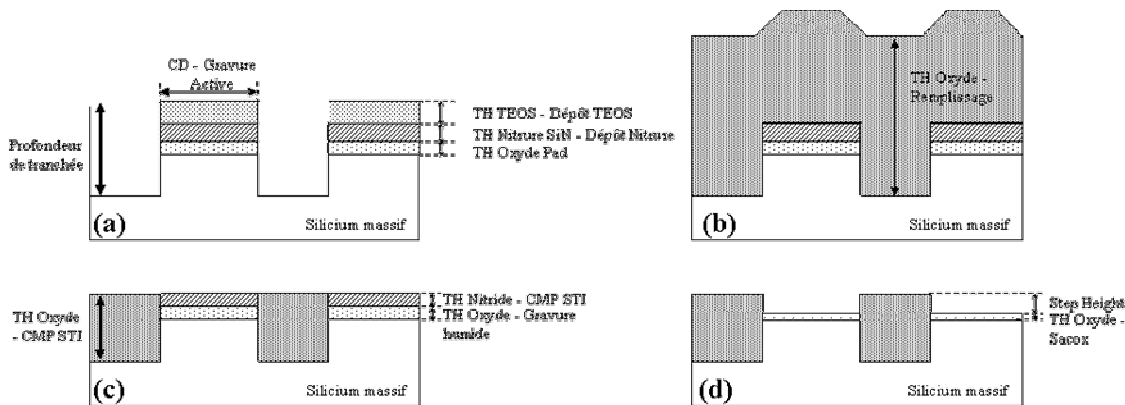


Figure 31. Représentation des couches mesurées dans le module d'isolation
(Après gravure des zones actives (a), après remplissage des tranchées (b),
après polissage (c) et à la fin du module d'isolation (d)).

Une quinzaine de mesures électriques permettent, à la fin des procédés de fabrication, de tester les principales caractéristiques de l'isolation (mesures de résistances, fuite d'isolation, ...).

1.1- Contexte d'étude

A la fin du module STI, la mesure de la hauteur de marche entre les zones actives et non actives (ou Step Height) est caractéristique de l'ensemble des opérations du module. Pour une technologie en phase de production, il est possible de déterminer l'influence du Step Height sur le rendement final des circuits (Figure 32). La référence de mesure du Step Height étant l'oxyde du STI, une valeur négative signifie que la zone active est plus basse que l'oxyde d'isolation.

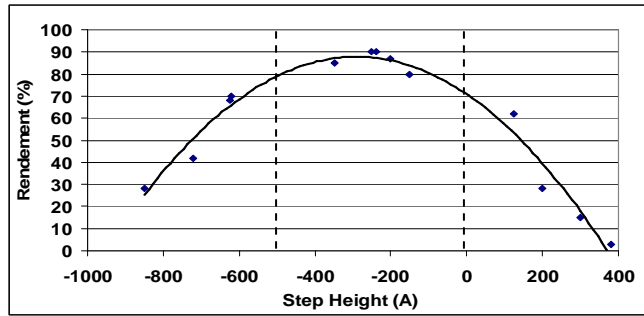


Figure 32. Influence du Step Height sur le rendement final des circuits (technologie 90nm).

Ainsi pour la technologie 90nm, les valeurs de Step Height doivent être comprises entre -500Å et 0Å afin de garder un rendement maximum. Ceci nécessite :

- D'optimiser les limites de spécifications de chacune des mesures du module d'isolation. Le Step Height dépendant des différents procédés de ce module il est nécessaire d'assurer une cohérence entre les spécifications afin de détecter en amont les dérives des procédés.
- De proposer des actions précises permettant de diminuer au maximum la variabilité du Step Height afin de garantir les performances électriques des circuits.

1.2- Intérêt de la modélisation des procédés d'isolation entre les transistors

Afin de diminuer la variabilité du Step Height et de définir les spécifications à appliquer à chacune des mesures du module d'isolation, trois possibilités peuvent être envisagées :

- Utiliser la connaissance des ingénieurs "device"¹³ pour optimiser les procédés les plus critiques. Cette méthode permet aussi de connaître l'ordre de grandeur des spécifications mais ne permet pas de proposer des spécifications tenant en compte de l'ensemble des interactions entre les procédés,
- Effectuer des plans d'expériences pour modéliser l'influence de chaque opération sur la valeur du Step Height. Pour ce cas d'étude, la mise en œuvre de plans d'expériences est lourde, notamment à cause du grand nombre d'opérations en jeu. La modélisation du second ordre des effets de chacune des 12 opérations X_i sur le Step-Height nécessite au minimum 91 expériences:

Step Height = fct(a	1 constante
+ $X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9 X_{10} X_{11} X_{12}$	12 effets directs
+ $X_1 X_2 X_1 X_3 X_1 X_4 X_1 X_5 X_1 X_6 X_1 X_7 X_1 X_8 X_1 X_9 X_1 X_{10} \dots$	66 interactions
+ $X_1^2 X_2^2 X_3^2 X_4^2 X_5^2 X_6^2 X_7^2 X_8^2 X_9^2 X_{10}^2 X_{11}^2 X_{12}^2$)	12 effets quadratiques

- Utiliser les méthodes statistiques proposées dans le chapitre II en corrélant les données mesurées sur les plaques de production.

¹³ Ingénieurs responsables du bon fonctionnement électrique des transistors.

La technologie 90nm étant en phase de production, de nombreuses mesures (plusieurs milliers) sont collectées pour chaque opération de métrologie. La Figure 33 décrit la répartition des mesures pour chacune de ces opérations de contrôle normalisée par rapport aux spécifications proposées par les ingénieurs "device".

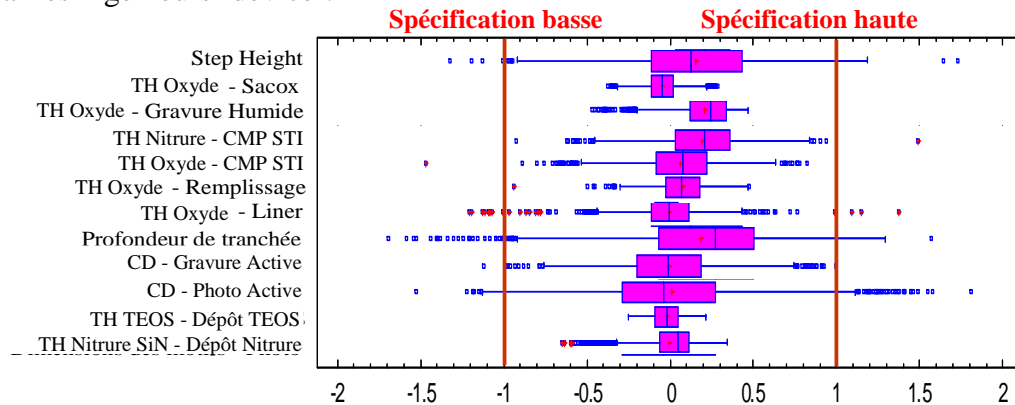


Figure 33. Répartitions des mesures pour chacune des opérations de métrologie du module STI.
(les valeurs sont normalisées par rapport aux spécifications définies par les ingénieurs "device").

La figure ci-dessus montre une grande variabilité des mesures par rapport aux spécifications. Nous remarquons particulièrement que le Step Height couvre la totalité de l'intervalle de spécification. Le nombre important de données ainsi que cette forte variabilité permet d'envisager une analyse statistique des corrélations entre les différents procédés sans réaliser d'expériences supplémentaires dans un premier temps. La modélisation de ces corrélations sera tout d'abord effectuée en utilisant l'approche multivariée pour quantifier les relations linéaires entre les mesures. Ensuite, la modélisation neuronale permettra éventuellement de caractériser les éventuelles relations non linéaires entre les paramètres.

La modélisation du module d'isolation se déroulera selon trois axes :

- Recherche des corrélations entre les procédés du module d'isolation. Cette analyse permettra de connaître statistiquement l'influence de chaque étape entre elles,
- Quantification de l'impact de la variabilité des mesures physiques sur les performances électriques des circuits,
- Modélisation des variations des mesures physiques en fonction du comportement des paramètres équipements. Cela permettra, pour chaque étape de procédé :
 - o De qualifier la pertinence des paramètres des équipements collectés,
 - o De fixer des limites de contrôles sur les paramètres les plus pertinents,
 - o De prédire, pour certains procédés, les résultats physiques sur les plaques grâce aux paramètres équipements.

II- Modélisation des interactions entre les procédés de la brique STI

Cette partie s'intéresse à la quantification des corrélations entre les résultats des différentes opérations de métrologie du module d'isolation. Dans un premier temps, nous présenterons les résultats statistiques de ces analyses. La signification physique de ces résultats sera ensuite discutée. Au cours de ces modélisations, nous quantifierons aussi l'impact des variations du Step Height sur les opérations réalisées à posteriori. Basé sur les relations mathématiques établies et physiquement validées, nous présenterons les actions proposées afin de réduire les variations du Step Height et nous vérifierons la cohérence entre les spécifications des mesures physiques.

II.1- Analyse statistique des corrélations entre les mesures physiques

Chacune des opérations de la brique STI est liée, de manière directe ou indirecte au paramètre de métrologie de sortie : le Step Height. Le Tableau 8 présente l'ensemble des corrélations entre les mesures du module STI. Le signe entre parenthèse indique la nature de la corrélation (positive ou négative).

Dans la gamme de variabilité étudiée, les modélisations statistiques montrent :

- Que la valeur du Step Height dépend essentiellement des variations du procédé de polissage mécanico-chimique. Un faible pourcentage de la variabilité des mesures effectuées après polissage est corrélé aux fluctuations du procédé de remplissage des tranchées.
- Une grande dépendance de la dimension des motifs gravés avec la largeur des motifs mesurés après l'opération de photolithographie.

Dans le second paragraphe de cette partie nous chercherons à valider physiquement les différentes corrélations mises en évidence dans le Tableau 8.

Introduction

Entrée \ Sortie	Indicateurs de corrélation		TH Oxyde - Pad	TH Nitrure SiN - Dépôt Nitrure	TH TEOS - Dépôt TEOS	CD - Photo Active	CD - Gravure Active	Profondeur de tranchée	TH Oxyde - Liner	TH Oxyde - Remplissage	TH Oxyde - CMP STI	TH Nitrure - CMP STI	TH Oxyde - Gravure Humide	TH Oxyde - Sacox
	R ²	Q ²												
TH Nitrure SiN - Dépôt Nitrure														
TH TEOS - Dépôt TEOS														
CD - Photo Active	5 %	4%	-	5 % (-)	-									
CD - Gravure Active	43 %	40%	-	2 % (-)	-	41 % (+)								
Profondeur de tranchée	12 %	10%	-	12 % (+)	-									
TH Oxyde - Liner														
TH Oxyde - Remplissage	8 %	7%	-	-	-	-	2 % (+)	6 % (-)	-					
TH Oxyde - CMP STI	25 %	24%	-	-	-	-	-	2 % (-)	-	23 % (+)				
TH Nitrure - CMP STI	27 %	24%	-	4% (+)	-	-	-	4 % (-)	-	19 % (+)				
TH Oxyde - Gravure Humide														
TH Oxyde - Sacox														
Step Height	85 %	85%	-	-	-	-	-	4 % (+)	-	9 % (-)	65 % (-)	7 % (-)		
											Pas de corrélation			
											Mesure réalisée à posteriori			

Tableau 8. Table des corrélations entre les mesures physiques du module d'isolation
 (Entrée représente la ligne des variables d'entrées / Sortie représente la colonne des variables de sortie).

II.2- Validation physique des relations entre les mesures physiques

Les corrélations établies entre les mesures physiques mettent en jeu des relations de topographie de surface. Cette modélisation des interactions physiques a pour principal objectif de mettre en évidence les origines des variations du paramètre "Step Height".

II.2.a- Modélisation de la variabilité des dimensions des motifs après photolithographie

L'analyse multivariée démontre que 5% des variations de la dimension des motifs mesurés après l'opération de photolithographie sont corrélées à des variations d'épaisseur de nitrure Si_3N_4 déposée. Cette relation s'explique par le fait que, même en présence d'un anti-réfléctif – BARC, le procédé de photolithographie n'est pas indépendant de la nature et de la forme des couches antérieures. Le faible degré de corrélation indique tout de même que cette dépendance reste minimale dans la gamme de variabilité étudiée.

II.2.b- Modélisation de la variabilité des dimensions des motifs gravés

La Figure 34 représente l'évolution linéaire des dimensions des zones actives après gravure en fonction des dimensions des motifs mesurés après photolithographie. Les corrélations nous montrent que, dans la zone de variabilité étudiée, les dimensions critiques des zones actives après gravure sont d'environ +1,22 fois moins importantes que les dimensions après photolithographie. Cette constatation rend compte de la gravure latérale des zones actives lors de la gravure plasma.

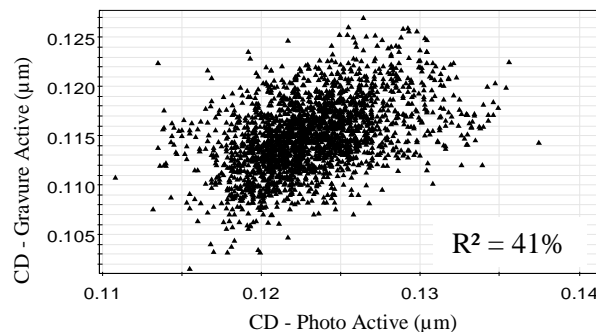


Figure 34. Dimensions des zones actives en fonction des dimensions des motifs après photolithographie.

Cette analyse démontre également que plus de 50% de la variabilité de la mesure CD après gravure n'est pas expliquée par des variations de mesures physiques antérieures. Nous admettons qu'une part de ce pourcentage provient des erreurs de mesure des dimensions des motifs.

II.2.c- Modélisation de la variabilité de la profondeur de la tranchée après gravure

L'épaisseur mesurée après la gravure de la tranchée est réalisée par mesure profilométrique c'est-à-dire que l'on mesure la hauteur de marche entre le fond de la tranchée et le sommet de l'empilement silicium + oxyde de silicium + nitrure + masque dur en TEOS. La Figure 35 présente la différence entre la hauteur de tranchée mesurée et celle réelle (sans les couches de TEOS, nitrure et Oxyde Pad).

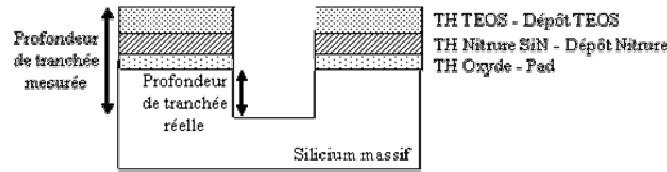


Figure 35. Profondeur de tranchée mesurée vs profondeur de tranchée réelle.

La Figure 36 montre la corrélation entre l'épaisseur de nitrure déposée et les hauteurs de marche mesurées et réelles.

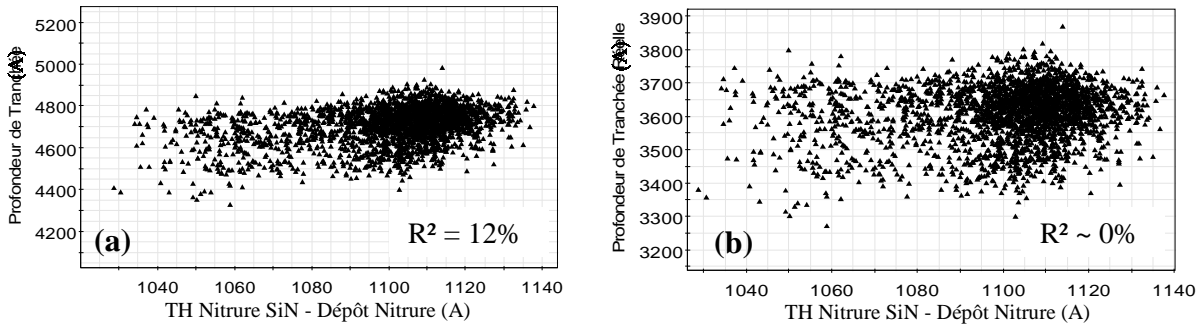


Figure 36. Influence de l'épaisseur de nitrure STI déposée sur la profondeur des tranchées gravées. (profondeur de tranchée mesurée (a) et réelle (b)).

Même si la profondeur de tranchée mesurée apparaît comme étant linéairement et positivement corrélée à l'épaisseur de nitrure déposée, la profondeur de tranchée réelle n'est elle pas corrélée à l'épaisseur de nitrure dans la gamme de variation étudiée. Les variations de la profondeur de tranchée réelles sont seulement dues aux variations du procédé de gravure sèche et non aux étapes antérieures.

II.2.d- Modélisation de la variabilité des mesures d'épaisseur après remplissage des tranchées

Les analyses multivariées montrent que seulement 8% de la variabilité de l'épaisseur d'oxyde dans les tranchées après remplissage dépendent des opérations antérieures. Le coefficient de corrélation positif liant la dimension critique de la zone active à l'épaisseur d'oxyde après remplissage caractérise le fait que lorsque la part des zones actives augmente ($W_2 > W_1$), alors le volume des tranchées à remplir devient moins important. L'épaisseur mesurée en devient plus grande ($Ep_2 > Ep_1$) (Figure 37).

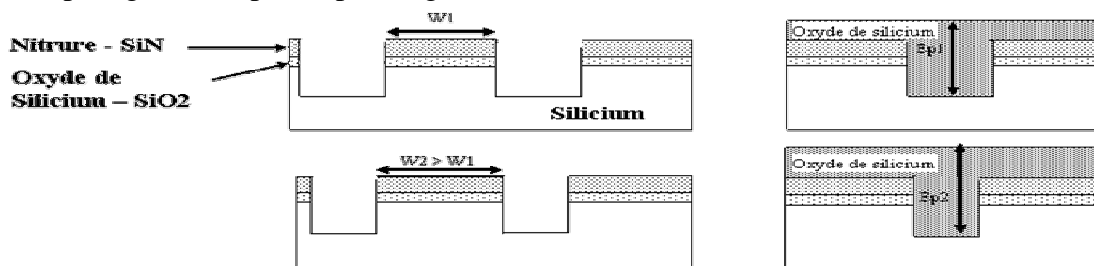


Figure 37. Influence des dimensions des zones actives sur le remplissage des tranchées.

La relation entre l'oxyde mesuré après remplissage des tranchées et la profondeur des tranchées s'appuie sur un raisonnement identique. Plus la profondeur de tranchée est faible, plus le volume à remplir sera faible lui aussi. L'épaisseur d'oxyde déposée sera donc plus importante.

II.2.e- Modélisation de la variabilité des épaisseurs d'oxyde et de nitrure après polissage mécanico-chimique

La fin du procédé de polissage mécanico-chimique repose sur un système de détection de fin d'attaque. Ce système mesure l'épaisseur d'oxyde moyen restant ("moyenne" des zones actives et non actives) et arrête le procédé lorsque la valeur d'oxyde cible est atteinte. La détection de fin d'attaque permet de corriger une partie des variations engendrées par la gravure des tranchées. La légère corrélation entre l'épaisseur d'oxyde post-polissage et la profondeur de tranchée ($R^2=20\%$) montre que le procédé de polissage (Tableau 8) reste sensible aux variations de la profondeur de tranchée, le système de détection n'étant pas assez sensible pour détecter de faibles variations de la profondeur de la tranchée. Ceci explique la corrélation entre l'épaisseur d'oxyde après polissage et après remplissage des tranchées.

La Figure 38 décrit les relations existantes entre l'épaisseur de nitrure restante après polissage et les mesures effectuées pour contrôler les opérations antérieures.

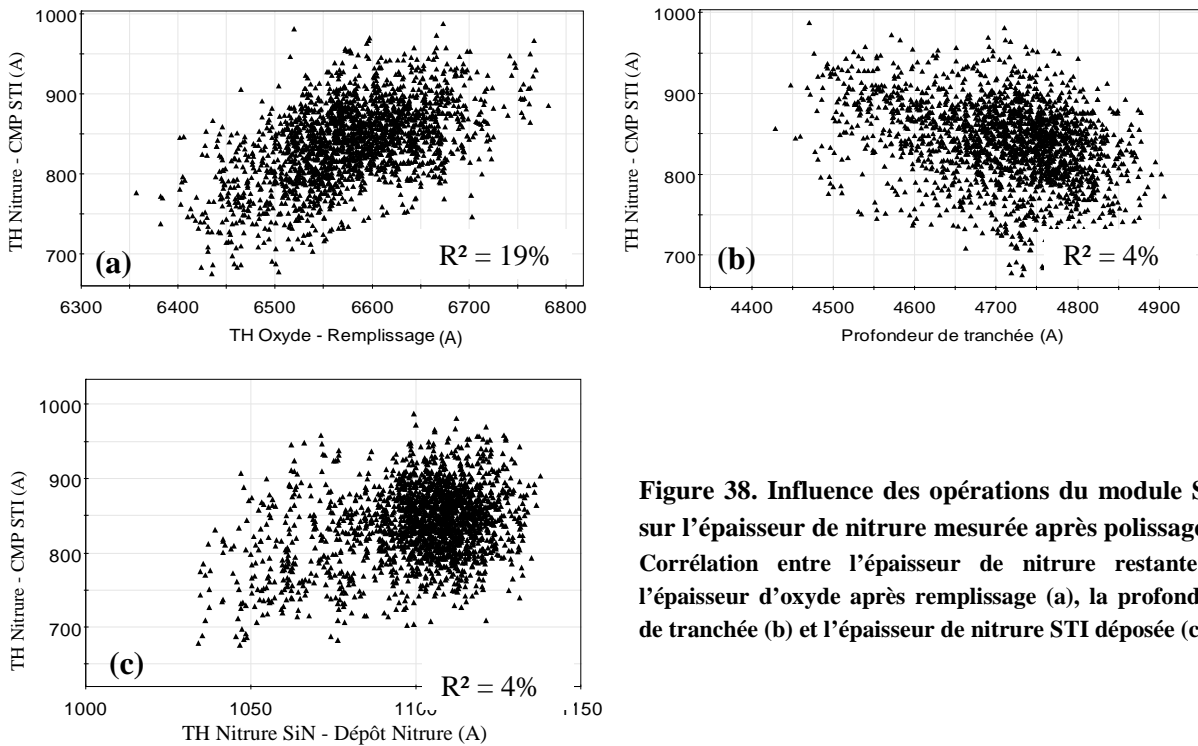


Figure 38. Influence des opérations du module STI sur l'épaisseur de nitrure mesurée après polissage. Corrélation entre l'épaisseur de nitrure restante et l'épaisseur d'oxyde après remplissage (a), la profondeur de tranchée (b) et l'épaisseur de nitrure STI déposée (c).

L'épaisseur de nitrure après polissage est corrélée négativement à la profondeur de tranchée (b). En effet, si la profondeur de tranchée gravée augmente, alors pour garder une même épaisseur d'oxyde, le procédé de polissage polira plus longtemps et consommera plus de nitrure. Le système de détection de fin d'attaque, ne corrigeant pas toutes les variations de la profondeur

de tranchée, l'épaisseur de nitrure, tout comme l'épaisseur d'oxyde, dépend de l'épaisseur de l'oxyde après remplissage des tranchées (a).

Le dépôt de nitrure en tout début de gamme de fabrication contribue positivement aux variations de l'épaisseur de nitrure après polissage (c).

II.2.f- Modélisation des variations du Step Height en fonction des mesures physiques du module d'isolation

Le Step Height est la résultante de l'ensemble des opérations du module d'isolation. Les analyses multivariées mettent en évidence que près de 85% de la variabilité de ce paramètre provient des opérations de fabrication précédentes (Tableau 8). Le polissage mécano-chimique apparaît comme le principal contributeur (un pourcentage de cette contribution étant due au remplissage ainsi qu'à la gravure des tranchées) auquel vient s'ajouter la contribution de la gravure humide (Figure 39).

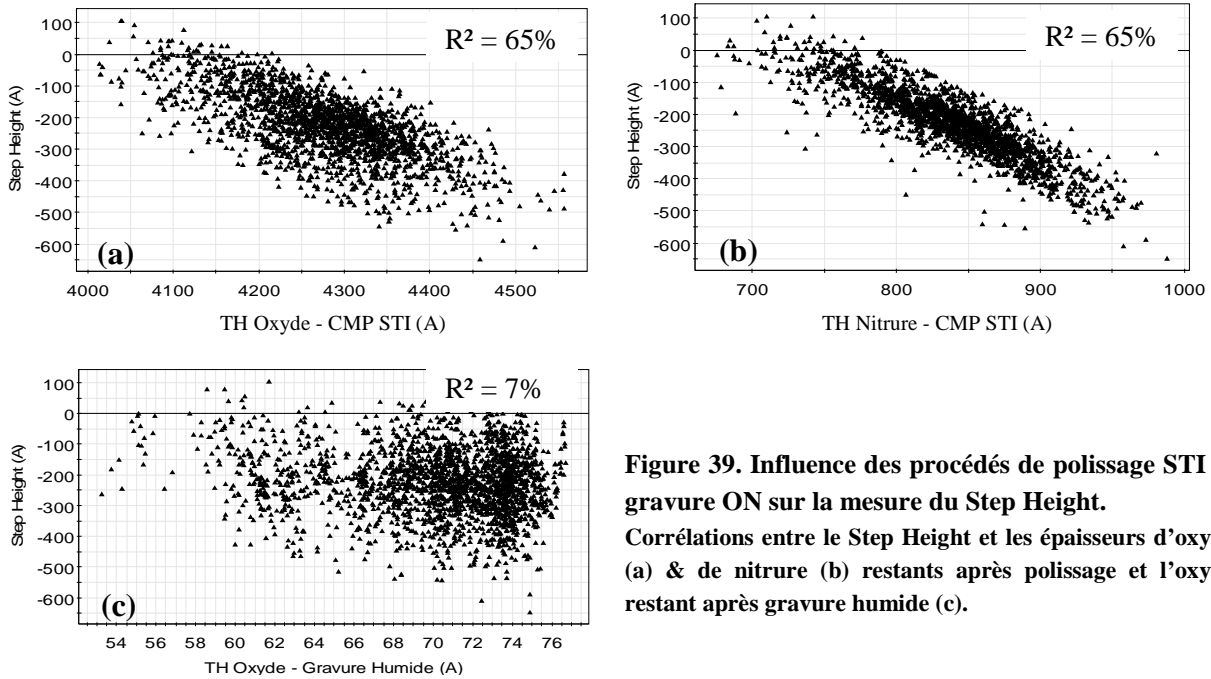


Figure 39. Influence des procédés de polissage STI et gravure ON sur la mesure du Step Height. Corrélations entre le Step Height et les épaisseurs d'oxyde (a) & de nitrure (b) restants après polissage et l'oxyde restant après gravure humide (c).

La hauteur de marche est corrélée négativement avec les épaisseurs d'oxyde et de nitrure restantes (Figure 39-a & -b). En effet, l'étape de gravure humide (bains composés de H₃PO₄ et HF) consiste à éliminer la couche de nitrure sans trop graver l'oxyde. L'épaisseur de nitrure retirée définit le Step Height (Figure 40). Le Step Height corrèle mieux avec l'épaisseur de nitrure qu'avec celle d'oxyde car la hauteur de nitrure enlevée donne directement le Step Height.



Figure 40. Influence de la gravure humide ON STI sur l'empilement des couches. (avant (a) et après (b) gravure humide).

Le coefficient reliant les variations du Step Height aux fluctuations de l'épaisseur d'oxyde après polissage est naturellement proche de 1 dans la gamme de variabilité étudiée : (Step Height) = (TH Oxyde - CMP STI) + C^{ste}. Le terme constant de l'ordre de 3000Å représente la profondeur de tranchée réelle après gravure plasma.

La relation entre la hauteur de marche et l'épaisseur de nitrure après polissage se démontre en modélisant le déroulement de l'étape de gravure humide :

Pour alléger la précédente notation, soit :

Th_{sac}, la hauteur de marche entre les zones actives et non actives à la fin de la brique STI (Step Height).

Th_{pad}, l'épaisseur d'oxyde Pad (TH Oxyde - Pad).

Th_{on}, l'épaisseur d'oxyde restant après la gravure humide (TH Oxyde - Gravure Humide).

Th_{nit}, l'épaisseur de nitrure après le polissage mécano-chimique (TH Nitrure - CMP STI).

Le Step Height final est relié à l'épaisseur d'oxyde restant après la gravure humide par la loi linéaire suivante :

$$Th_{sac} = b * Th_{on} + c \quad (1)$$

L'épaisseur d'oxyde restant après gravure humide dépend de l'épaisseur initiale de l'oxyde pad et de l'épaisseur d'oxyde consommé lors de la gravure soit :

$$Th_{on} = Th_{pad} - Th_{ox\ consommé} \quad (2)$$

L'épaisseur d'oxyde consommée dépend de l'épaisseur de nitrure restant après le polissage, de la vitesse d'attaque du nitrure du bain d'H₃PO₄, V_{nit}, et de la vitesse d'attaque de l'oxyde V_{ox} qui est reliée à la vitesse d'attaque du nitrure :

- Par la sélectivité s : $V_{ox} = s V_{nit} \quad (3)$

- Et par le temps t_{H3PO4}, de l'étape de retrait nitrure dans le bain H₃PO₄. Le temps dans le bain H₃PO₄ correspond au temps pour retirer le nitrure puis attaquer l'oxyde :

$$t_{H3PO4} = t_{nit} + t_{ox} \quad (4) \quad \text{avec } t_{nit} = Th_{nit}/V_{nit} \quad (5)$$

Le temps correspondant à l'attaque de l'oxyde est donc : $t_{ox} = t_{H3PO4} - Th_{nit}/V_{ni} \quad (6)$

L'épaisseur d'oxyde consommée lors de la gravure humide est par conséquent :

$$Th_{ox\ consommé} = t_{ox} * V_{ox} \quad (7)$$

Soit d'après (3) : $Th_{ox\ consommé} = t_{ox} * s V_{nit} \quad (8)$

Et d'après (6) l'épaisseur devient : $Th_{ox\ consommé} = (t_{H3PO4} - Th_{nit}/V_{nit}) * s * V_{nit} \quad (9)$

La hauteur de marche est donc déterminée à partir des équations (1), (2) et (9) par la relation :

$$Th_{sac} = b * (Th_{pad} - Th_{ox\ consommé}) + c \quad (10)$$

$$Th_{sac} = b * (Th_{pad} - (t_{H3PO4} * s V_{nit} - Th_{nit} * s)) + c \quad (11)$$

La sélectivité sur les lots de production est assimilée à la sélectivité mesurée sur les

plaques vierges (sans étape antérieure) soit $s = \frac{V_{oxyde}}{V_{Nitrure}} = \frac{1}{200}$.

L'expression simplifiée du Step Height en fonction de l'épaisseur de nitrure mesurée après polissage devient donc :

$$Th_{sac} = - 2.78 * Th_{nit}$$

Ce résultat théorique concorde avec le résultat empirique déterminé à l'aide de l'analyse de données où l'on obtient (Step Height) = -2.52* (TH Nitrure – CMP) + C^{ste}.

II.3- Impact des variations des procédés du module STI sur les opérations suivantes

La Figure 41 ci-dessous montre les résultats des analyses caractérisant l'impact des variations du Step Height sur les résultats des opérations suivantes. L'influence principale du Step Height se situe au niveau des étapes de photolithographie définissant les zones actives à implanter (source / drain). Afin de ne pas surcharger le manuscrit, seules les corrélations entre le Step Height et les dimensions des motifs définissant les zones à implanter P sont représentées. Les modèles définis pour les zones à implanter N sont similaires. La figure ci-dessous illustre la relation linéaire et positive entre le Step Height et les mesures post photolithographie ; l'indicateur R², de l'ordre de 40% dénote une dépendance importante de ces dernières mesures par rapport au Step Height.

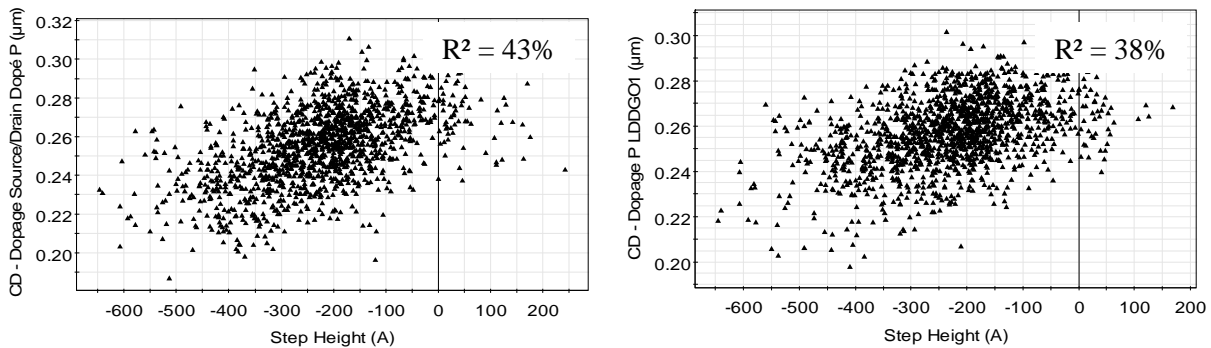


Figure 41. Impact des variations du Step Height sur les dimensions des motifs mesurés après les opérations de photolithographie associées aux implantations des zones actives (seuls les dopages P sont représentés).

Ces relations mettent en évidence le phénomène de "swing curve" [WOLF 2000]. Les variations de Step Height contribuent aux variations des dimensions des motifs de photolithographie à cause des réflexions parasites de la lumière sur les couches sous la résine lors de l'insolation de celle ci [DE CAUNES 2006]. Nous verrons par la suite que les variations de ces dimensions influencent les caractéristiques électriques des transistors.

II.4- Réduction de la variance du Step Height

Sans effectuer d'expérience supplémentaire, l'analyse multivariée des données sur les plaques de production a permis de quantifier l'ensemble des interactions entre les différentes étapes du module d'isolation. D'après la méthodologie développée, cette compréhension de la source de la variance permet :

- De proposer des actions précises de réduction des principales sources de variabilité,
- De valider les spécifications appliquées aux différentes mesures physiques,

II.4.a- Proposition de solution pour la diminution de la variabilité du Step Height

Afin de garantir des rendements élevés, il est nécessaire de diminuer au maximum la variabilité du Step Height (Figure 32). La modélisation du module d'isolation a permis d'identifier les principales causes de variabilité de ce paramètre. Nous avons ainsi démontré que la majeure partie de la variabilité de ce paramètre est corrélée aux variations des procédés :

- De gravure des tranchées d'isolation,
- De polissage mécano-chimique,
- De remplissage de ces tranchées,
- Et de gravure humide.

Après avoir identifié l'origine de la variance, il est nécessaire d'en déterminer la nature. L'analyse de variance est l'outil le plus adapté pour ce type d'étude [TUFFERY 2005]. Cette analyse statistique prédictive permet, dans notre cas d'étude, d'identifier la nature de la variabilité des données. Au niveau d'une étape de procédé, on distingue donc plusieurs types de variabilité :

- Lot à lot,
- Plaques à plaques,
- Site à site,
- Machines de procédé (ou de mesure) à machine de procédé (ou de mesure),
- Produit à produit.

La connaissance de la nature de la variabilité permet de déterminer le type d'action à mettre en place pour la diminuer. Ainsi, la réduction de la variabilité lot à lot sera effectuée en implémentant une boucle de régulation Run to Run alors que la réduction de la variabilité site à site nécessitera tout d'abord une optimisation du procédé. La Figure 42 présente les résultats de l'analyse de variance réalisée les paramètres du module d'isolation corrélés au Step Height.

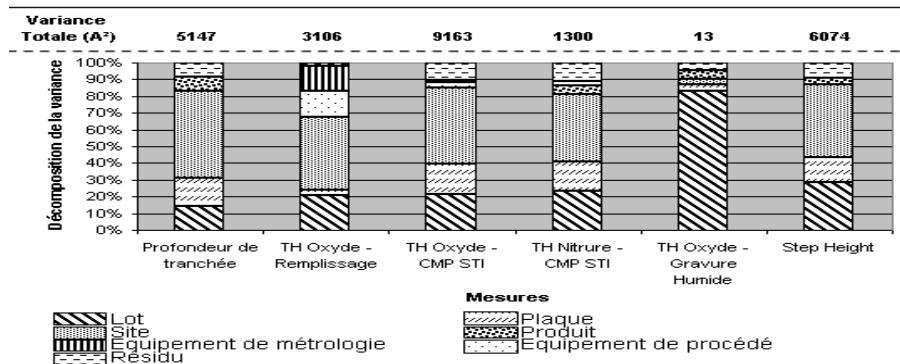


Figure 42. Décomposition de variance de paramètres du module d'isolation (Données de Juin à Décembre 2005).

Une grande partie de la variabilité du Step Height provient des effets site à site et lot à lot. La modélisation précédemment effectuée définie :

- Que cette variabilité provient du procédé de polissage mécanico-chimique (TH Oxyde CMP STI - une partie de la variabilité du procédé de polissage provient des étapes de gravure et de remplissage des tranchées).
- Que l'étape de gravure humide contribue à une augmentation de l'effet lot de l'ordre de 7%.

Afin de réduire la variation lot à lot du Step Height, deux solutions sont envisagées :

- Implémenter une boucle de régulation Feed Back au niveau du procédé de polissage,
- Mettre en production une boucle de régulation Feed Forward au niveau du procédé de gravure humide. Un ajustement du temps du procédé de gravure permettrait de diminuer la variabilité lot à lot du Step Height. L'optimisation de ce système d'asservissement nécessite toutefois de comprendre l'origine de la variabilité lot à lot engendrée par la gravure humide.

Pour la technologie 90nm, la seconde solution a été choisie car :

- Cette solution est plus facile à mettre en oeuvre,
- Un changement du liquide abrasif – slurry utilisé lors du polissage allait être effectué quelques mois plus tard. Le modèle établi avec l'ancien slurry ne serait plus valable après le changement.

La gravure humide est constituée principalement de deux étapes : une première étape de gravure de l'oxyde dans un bain de HF et une seconde de retrait du nitrure dans un bain de H₃PO₄. Le Step Height représentant la différence de hauteur d'oxyde STI entre les zones actives et non actives, la boucle de régulation vise à ajuster le temps de gravure de l'oxyde dans le bain de HF. La Figure 43 présente le scénario de cette boucle de régulation ainsi que les gammes de compensation choisies. En fonction de l'épaisseur de nitrure mesurée post CMP, le système informatique définit l'ajustement du temps de la gravure HF.

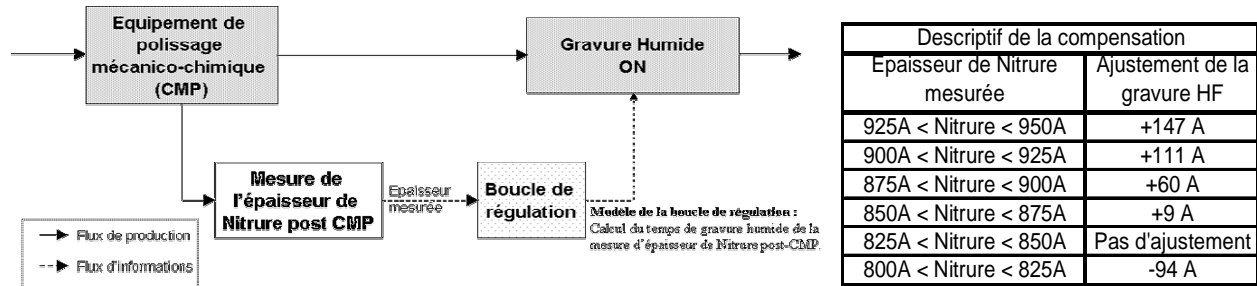


Figure 43. Fonctionnement de la boucle de régulation Feed forward appliquée à la gravure humide.

La Figure 44 présente les résultats de simulation de la boucle de régulation proposée. L'implémentation de cette boucle permettrait de diminuer de 40% la variabilité du Step Height.

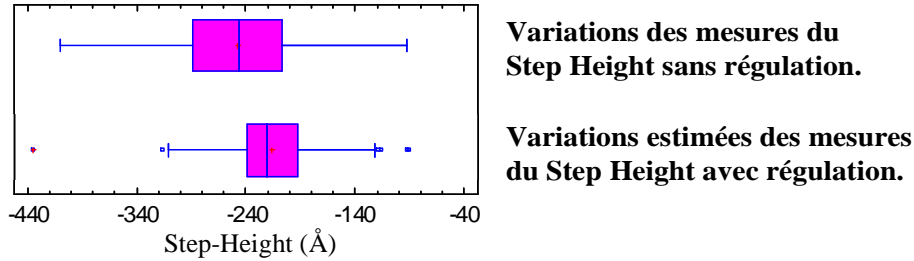


Figure 44. Simulation des résultats de la boucle de régulation STI.

Remarque : la compréhension du faible effet lot induit par la gravure humide est traitée dans le paragraphe IV.5. L'analyse des paramètres de l'équipement collectés pendant le procédé permettra de mieux appréhender l'origine de cette variabilité.

La mise en place d'une boucle de régulation au niveau de la gravure humide offre une possibilité de diminuer l'effet lot observé en Step Height. Le paragraphe suivant propose une seconde voie d'amélioration de la variabilité de ce paramètre en s'attaquant aux variations entre les différents sites de mesure.

II.4.b- Optimisation du procédé de gravure sèche des zones actives

Les analyses de corrélation montrent qu'un faible pourcentage de la variabilité du Step Height provient de la variabilité de la profondeur des tranchées engendrée lors de la gravure des zones actives (Tableau 8). La Figure 42 montre une forte variabilité site à site des mesures de profondeur de tranchée. Cette variabilité se retrouve sur toutes les mesures du module STI jusqu'au Step Height.

Les résultats des expérimentations montrent qu'une amélioration de la dispersion intra-plaque s'accompagne d'une augmentation de la pente des motifs gravés (Figure 45). Une telle dégradation des profils pouvant impliquer des problèmes de remplissage par la suite, aucune amélioration de variabilité du Step Height ne peut être effectuée en optimisant le procédé actuel de gravure des tranchées (limitation due à l'équipement de procédé).

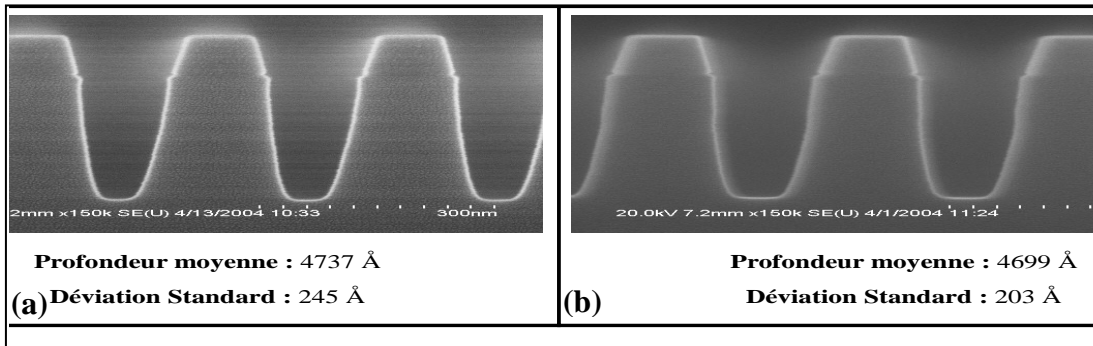


Figure 45. Impact de l'amélioration de la dispersion intra-plaque sur la pente des motifs après gravure STI
Coupes TEM des motifs gravés avant (a) et après (b) amélioration de la dispersion intra plaque.

Les analyses de corrélations entre les différentes mesures physiques effectuées dans le module d'isolation ont mis en évidence l'ensemble des relations d'influence entre chacune des opérations de fabrication. La méthodologie employée a permis, sans expérience supplémentaire,

de quantifier ces corrélations, d'analyser les principales sources de variations du Step Height et de proposer des actions de réduction de cette variance. Dans le paragraphe suivant, nous proposons d'utiliser les modèles statistiques obtenus afin d'optimiser le plan de contrôle des mesures physiques.

II.5- Vérification de la cohérence des spécifications appliquées à chacune des étapes de procédé

Dans l'introduction de ce chapitre, nous avons montré combien il était important que la valeur du Step Height soit comprise entre -500 Å et 0Å. La modélisation des corrélations entre les mesures physiques du module d'isolation a démontré que la valeur du Step Height dépend de plusieurs opérations. Par conséquent, afin de prévenir au plus vite des mesures hors spécifications du Step Height, il est nécessaire d'appliquer des spécifications adéquates sur les mesures antérieures corrélées. Le Tableau 9 présente une comparaison entre spécifications utilisées avant l'analyse de modélisation du module STI et celles proposées suite à cette modélisation.

		Step Height (Å)	TH Oxyde - Sacox (Å)	TH Oxyde - Gravure Humide (Å)	TH Nitrure - CMP STI (Å)	TH Oxyde - CMP STI (Å)	TH Oxyde - Remplissage (Å)	TH Oxyde - Liner (Å)
Limites proposées	Spécification Basse	0			662	3977	6239	
	Target	-200			821	4232	6489	
	Spécification Haute	-500			980	4487	6739	
Anciennes limites	Spécification Basse	0	68	40	600	3600	6100	90
	Target	-200	75	65	800	4200	6600	100
	Spécification Haute	-500	82	90	1000	4800	7100	110

		Profondeur de tranchée (Å)	CD - Gravure Active (µm)	CD - Photo Active (µm)	TH TEOS - Dépôt TEOS (Å)	TH Nitrure SiN - Dépôt Nitrure (Å)	TH Oxyde - Pad (Å)
Limites proposées	Spécification Basse	4519	0.106	0.122		981	
	Target	4690	0.112	0.125		1083	
	Spécification Haute	4861	0.118	0.128		1186	
Anciennes limites	Spécification Basse	4500	0.103	0.12	450	990	68
	Target	4700	0.115	0.127	500	1100	75
	Spécification Haute	4900	0.127	0.134	550	1210	82

Pas de corrélation définie avec le Step Height

Tableau 9. Présentation des spécifications des mesures physiques du module STI. Comparaisons entre les limites utilisées par la ligne de production et celles déterminées à l'aide des modèles statistiques.

Les variations des épaisseurs d'oxyde mesurées après les procédés de recuit rapide n'étant pas corrélées à la variabilité des étapes antérieures, aucune spécification ne peut être proposée en se basant sur les analyses effectuées.

D'après les spécifications du Step Height et les corrélations établies, de nouvelles limites, plus resserrées dans la plupart des cas, sont à appliquer aux mesures du module d'isolation. Ces limites sont plus pertinentes d'un point de vue statistique car, grâce au modèle multivarié, elles prennent en compte l'ensemble des interactions entre les mesures physiques du module STI. Des simulations prouvent que les spécifications proposées dans le Tableau 9 permettent d'améliorer la capacité de détection des mesures hors spécifications. Le Tableau 10 présente le pourcentage de mesures hors spécifications (OOS) au Step Height détecté plus tôt à l'aide des nouvelles spécifications.

	Nombre de OOS au Step Height	TH Nitrure - CMP		TH Oxyde - CMP		TH Oxyde - Remplissage		Profondeur de tranchée	
		Nb	%	Nb	%	Nb	%	Nb	%
Mesures hors spécifications détectées avec les anciennes limites	25	1	4%	1	4%	0	0%	0	0%
Mesures hors spécifications détectées avec les limites proposées		10	40%	10	40%	7	28%	6	24%

Tableau 10. Pourcentage de mesures du Step Height hors spécification détecté à l'aide des spécifications calculées statistiquement. (période du 22 Août au 15 Novembre 2005).

Les nouvelles spécifications, permettent de prédire des mesures hors spécifications en Step Height. Cette détection en amont diminue la probabilité d'obtenir des pertes de rendements :

- Soit en re-traitant les plaques. Une plaque sous polie, détectée hors limite par valeur haute (épaisseur de nitrure ou d'oxyde trop importante), sera re-polie avec un temps t à définir pour obtenir l'épaisseur désirée. Sans une réelle cohérence entre les limites de spécifications, une telle plaque peut être jugée bonne au polissage mais induire un Step Height trop important. Cette méthode permet de ne pas envoyer la plaque au rebus,
- Soit en envoyant au rebus les plaques de façon préventive. Dans le cas d'un sur-polissage de la plaque, le modèle statistique prédit une mesure très faible de Step Height. Il n'y a alors aucune raison d'effectuer les procédés suivants. Cette détection préventive améliore les temps de cycle de fabrication.

Grâce aux modèles multivariés établis des actions ont pu être proposées afin de diminuer les sources de variations du Step Height et la cohérence entre les spécifications a aussi pu être établie. Dans la partie suivante de ce chapitre, nous allons étudier, à travers l'analyse statistique des données l'influence des variations des opérations de fabrication du module d'isolation sur certains paramètres électriques.

III- Modélisation de l'influence des variations des mesures physiques du module STI sur les principales caractéristiques électriques

La seconde partie de ce chapitre étudie l'influence des variations des procédés du module d'isolation sur certaines mesures électriques effectuées à la fin des opérations de fabrication. L'ensemble des mesures électriques potentiellement influençables par des variations des procédés du module STI seront prises en compte. Les mesures étudiées se regroupent en plusieurs classes :

- Dimensions électriques des structures,
- Courants et tensions des transistors
- Tensions de claquage et courant de fuite entre deux zones actives,
- Résistances carrées de structures.

Le premier paragraphe présentera les résultats des analyses multivariées. La signification physique des corrélations sera ensuite discutée. Les relations mathématiques établies permettront

de vérifier la cohérence des spécifications entre les mesures électriques et les mesures physiques et d'évaluer l'impact des solutions de réductions de variabilité proposées ci-dessous sur les variations des mesures électriques.

III.1- Analyse statistique des corrélations entre les mesures physiques et électriques du module STI

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons montré que le Step Height influence le rendement final des circuits. Dans les paragraphes suivants, nous nous proposons de quantifier l'impact des variations des procédés du module d'isolation sur les mesures électriques réalisées en toute fin de production. Le Tableau 11 ci-dessous présente les résultats des analyses de corrélations multivariées entre les mesures physiques du module STI et les mesures électriques potentiellement influençables.

Les résultats statistiques montrent :

- Que les dimensions électriques de la grille (CDPP_UN) et des zones actives (CSDP_UN) ainsi que les résistances des structures (RSSDxxx) sont influencées par les variations des dimensions physiques des zones actives,
- Que certaines tensions de claquage (BVxxx) sont liées à la profondeur des tranchées d'isolation,
- Et qu'un pourcentage des variations des caractéristiques des transistors est expliqué par des variations de Step Height.

Dans le second paragraphe nous chercherons à valider physiquement les différentes corrélations mises en évidence dans le Tableau 11.

Introduction

Entrée Sortie	Pourcentage de corrélation	TH Oxyde - Pad	TH Nitrure SiN - Dépôt Nitrure	TH TEOS - Dépôt TEOS	CD - Gravure Active	Profondeur de tranchée	TH Oxyde - Liner	TH Oxyde - Remplissage	TH Oxyde - CMP STI	TH Nitrure - CMP STI	TH Oxyde - Gravure Humide	TH Oxyde - Sacox	Step Height
RSSDN11	42 %	-	-	-	42 %	-	-	-	-	-	-	-	-
RSSDN1114	39 %	-	-	-	39 %	-	-	-	-	-	-	-	-
RSSDP11	61 %	-	-	-	61 %	-	-	-	-	-	-	-	-
RSSDP1114	52 %	-	-	-	52 %	-	-	-	-	-	-	-	-
RSSDP1114_UN	33 %	-	-	-	33 %	-	-	-	-	-	-	-	-
RSPP3_UN	10 %	-	-	-	-	10 %	-	-	-	-	-	-	-
CSDP_UN	88 %	-	-	-	88 %	-	-	-	-	-	-	-	-
CDPP_UN	16 %	-	-	-	16 %	-	-	-	-	-	-	-	-
BVNWPW22	15 %	-	-	-	-	-	-	-	15 %		-	-	15 %
BVNWNW100	3 %	-	-	-	3 %	-	-	-	-	-	-	-	-
LKNWPW22C	5 %	-	-	-	5 %	-	-	-	-	-	-	-	-
RSNW_STI	34 %	-	-	-	-	9%	-	9 %	16 %		-	-	16 %
RSNW_OD	2 %	-	-	-	2 %	-	-	-	2 %		-	-	2 %
RSNISO30	20 %	-	-	-	-	-	-	5 %	15 %		-	-	15 %
W = 1µm & L = 0.1µm	NIDL & NIDS	10 %	-	-	-	-	-	-	10 %		-	-	10%
	NVT	10 %	-	-	-	-	-	-	10 %		-	-	10 %
	PIDS	15 %	-	-	-	-	-	-	15 %		-	-	15 %
	PVT & PIDL	15 %	-	-	-	-	-	-	15 %		-	-	15 %
W = 0.12µm & L = 0.1µm	NIDL & NIDS	15 %	-	-	-	12 %	-	-	3 %		-	-	3%
	NVT	11 %	-	-	-	10 %	-	-	1 %		-	-	1 %
	PIDS	15 %	-	-	-	11 %	-	-	4 %		-	-	4 %
	PVT & PIDL	10 %	-	-	-	8 %	-	-	2 %		-	-	2 %

Tableau 11. Modélisation de l'impact des variations des mesures physiques sur les principales mesures électriques du module d'isolation
(le pourcentage de variations attribué au Step Height est égal à celui attribué aux mesures post CMP dû à la forte corrélation entre ces mesures).

III.2- Validation physique des relations entre les mesures physiques et électriques

III.2.a- Mesures de résistance

La première famille de mesures destinées à tester le comportement électrique de l'isolation est composée de mesures de résistances effectuées sur des zones non actives de différentes dimensions.

Parmi ces mesures, on distingue 3 types de résistances carrées mesurées dans la ligne de production :

- Les résistances carrées dopées (N+ ou P+) silicurrées en milieu isolé (RSSDN11 & RSSDP11).

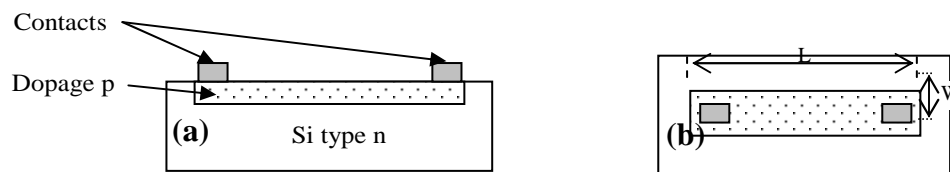


Figure 46. Représentation des structures de test de type "résistances carrées dopées non silicurrées".

Vue en coupe (a) et vue du dessus (b).

La valeur remontée par le système de mesure est la résistance carrée R_{\square} du barreau de zone active dopé N+ (RSSDN11) ou P+ (RSSDP11). On a :

$$R_{\square} = R_{\text{mesurée}} \cdot \frac{W}{L} = \frac{\rho}{D}$$

Avec : $R_{\text{mesurée}} = \rho \cdot \frac{L}{W \cdot D}$

L : Longueur de la structure (50 μm),

W : Largeur de la structure (0.11 μm). Equivalent à la largeur des zones actives (CD - Gravure Active),

ρ : Résistivité du matériau.

Le terme L/W permet, par approximation, de calculer la résistance carrée, fonction théoriquement de la résistivité et de l'épaisseur D seulement.

L'analyse de corrélation multivariée entre les valeurs de résistance et les paramètres mesurés en métrologie au sein de la brique STI nous montre que près de 50% de la variabilité du paramètre électrique est expliquée par des variations de procédés (Tableau 11). Dans la gamme de variabilité étudiée, les principaux paramètres corrélés aux valeurs de résistance (dopées N+ et P+) sont la largeur de la zone active W et la profondeur des tranchées d'isolation (Figure 47).

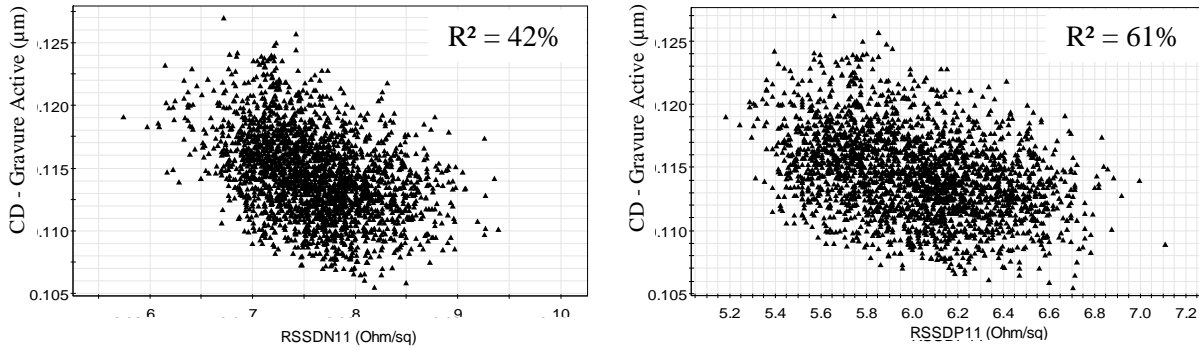


Figure 47. Evolution des résistances carrées RSSDN11 & RSSDP11 en fonction de la largeur physique des zones actives.

De par la faible largeur de zone active ($0.11\mu\text{m}$ pour la technologie 90nm), la résistance carrée est sensible aux variations du paramètre CD - Gravure Active. Le modèle établi entre la largeur des zones actives et les résistances corrélation est principalement linéaire et de signe négatif. Le coefficient de corrélation pour la zone dopée N+ est 2 fois plus important que celui mesuré pour la zone P+. Ceci signifie que la résistance RSSDN11 est deux fois plus sensible à une variation de la largeur de la zone active que la résistance RSSDP11. Ainsi, dans la zone de variabilité étudiée :

$$\begin{cases} \text{RSSDN11} \propto 2.29 / W \\ \text{RSSDP11} \propto 1.18 / W \end{cases}$$

On obtient $\text{RSSDN11} \approx 2 \text{ RSSDP11}$

Avec : $\text{RSSDN11} = \rho_N / D_N$

$\text{RSSDP11} = \rho_P / D_P$

On trouve que la résistivité dans le matériau de type N, ρ_N est 2 fois plus importante que celle dans le milieu de type P, ρ_P .

La variabilité non expliquée (50% de la variabilité totale) peut être attribuée soit aux variations des procédés de recuit ou aux variations de l'opération d'implantation. Cependant, l'impact de ces variations sur les mesures électriques ne peut être quantifié, les opérations correspondantes ne possédant aucune mesure physique associée. Une part plus ou moins importante des 50% non expliqués est la conséquence des incertitudes concernant les erreurs de mesures physiques et électriques.

- Les résistances non silicurées en milieu isolé RSSDN11_UN & RSSDP11_UN correspondent respectivement à des dopages de structure N+ et P+.

Les variations des mesures physiques du module STI expliquent 35% de la variabilité des résistances non silicurées. Le taux d'explication est moins important pour les résistances non silicurées (ici 35% contre 50% pour les résistances silicurées) : cette légère différence s'explique par le fait que les motifs silicurés ont une conduction de type métallique contrairement aux motifs non silicurés qui sont donc plus sensibles aux variations de procédés du module STI. Les

paramètres corrélés aux valeurs de résistance de la zone active non silicurée sont identiques à ceux de l'analyse des résistances silicurées.

- Les résistances silicurées en milieu dense RSSDN1114 & RSSDP1114 correspondent respectivement à des dopages de structure N+ et P+ (distance entre 2 structures = 0.14µm).

40% de la variabilité des résistances silicurées en milieu dense est expliquée par des variations de procédé du module STI. Les variations des paramètres en milieu dense sont moins bien expliquées qu'en milieu isolé (ici 40% contre 50% en milieu isolé). Cette différence s'explique par le fait qu'en zone dense, le facteur de voisinage est à prendre en compte.

- Autres mesures de résistances :

D'autres mesures de résistances sont effectuées afin d'évaluer l'influence des zones actives sur leurs zones voisines :

RSNW_STI :

Cette mesure caractérise la résistance de la zone du caisson dopé N sous la tranchée d'isolation (Figure 48).

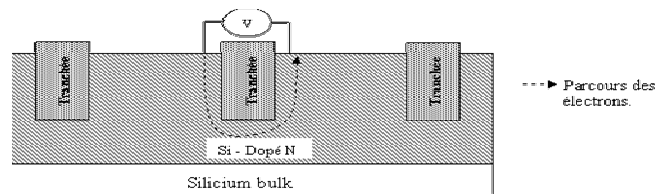


Figure 48. Représentation en coupe de la structure utilisée pour mesurer le paramètre RSNW_STI.

L'analyse multivariée démontre que dans la zone de variabilité étudiée, la variabilité de ce type de résistance est expliquée à 35% par les mesures physiques du module d'isolation. La Figure 49 représente les relations linéaires entre ce paramètre électrique et les principaux contributeurs.

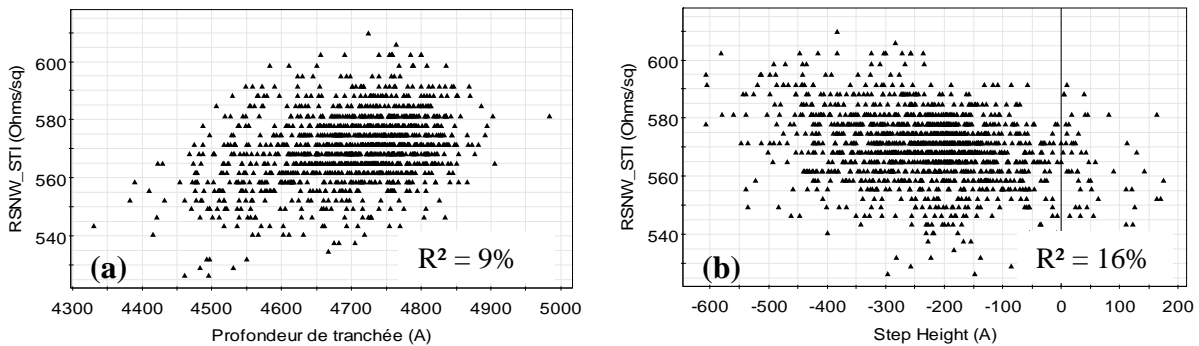


Figure 49. Corrélations entre le paramètre RSNW_STI et les mesures physiques du module STI.

Les principaux contributeurs sont :

- o La profondeur des tranchées d'isolation (a) : plus la profondeur des tranchées est grande, plus le chemin à parcourir par les électrons est important donc plus la résistance est grande (corrélation positive).

- L'épaisseur d'oxyde dans les tranchées après polissage mécano-chimique : plus l'épaisseur d'oxyde dans les tranchées est grande, plus cela signifie que la profondeur des tranchées est grande donc plus le chemin à parcourir par les électrons est important et ainsi plus la résistance est grande.
- L'épaisseur de nitrure après polissage mécano-chimique est très corrélée à l'épaisseur d'oxyde dans les tranchées donc la tension de claquage augmente avec l'épaisseur de nitrure.
- Le Step Height (b) : paramètre principalement corrélé aux épaisseurs de nitrure et d'oxyde après polissage mécano-chimique (corrélation négative).

III.2.b- Dimensions électriques déduites des valeurs de résistances :

Certaines mesures effectuées à la suite des opérations de fabrication caractérisent le comportement électrique des principaux paramètres du transistor MOS. Ces mesures sont de type comparatif dans le sens où l'on compare la valeur de la résistance mesurée sur un motif de dimensions connues (par défaut 1µm sur 1µm) à la valeur d'une résistance de dimensions égales à celles du transistor nominal de la technologie.

Pour la technologie 90nm on mesure ainsi deux grandeurs électriques caractérisant le transistor :

- La largeur électrique de la zone active (CSDP_UN). La Figure 50 présente une vue schématique de la structure de test utilisée pour mesurer la largeur électrique des zones actives.

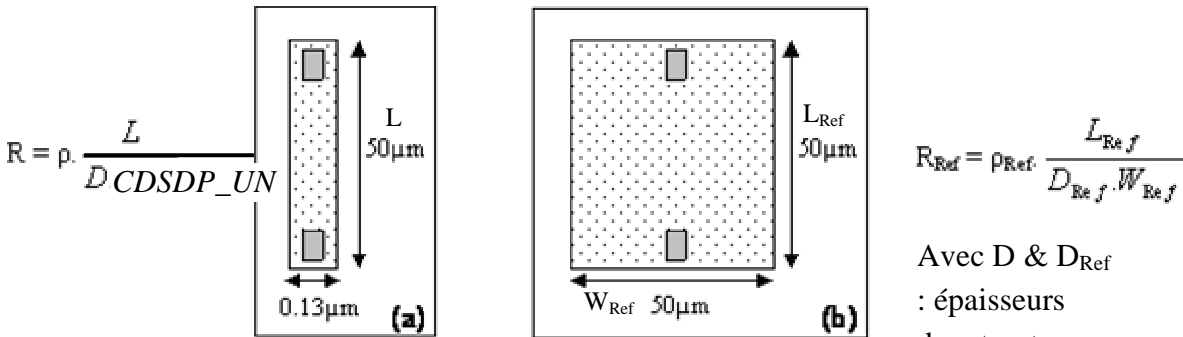


Figure 50. Schéma de la structure de test utilisée pour mesurer la largeur électrique des zones actives. Vue en coupe (a) et vue de dessus (b).

Du fait des dimensions importantes des longueurs L et D et de la promiscuité des deux sites de mesures, on fait l'approximation que :

$$L = L_{Ref} \quad D = D_{Ref} \quad \rho = \rho_{Ref} \text{ (résistivité de la structure)}$$

On obtient ainsi :

$$CSDSP_UN = \frac{R_{Ref}}{R} \cdot W_{Ref}$$

$$CSDSP_UN = A / R$$

$$\text{Avec } A = W_{Ref} \cdot R_{Ref}$$

Remarque : La résistance R est mesurée sur la même structure que le paramètre RSSDP_UN.

Les analyses de corrélations montrent que près de 90% de la variabilité de la largeur électrique de la zone active est expliquée par les variations des mesures physiques du module STI. Les 10% non expliqués sont attribués à l'erreur effectuée lors des mesures électriques et physiques. Naturellement, il apparaît que ce paramètre est principalement corrélé positivement à la largeur physique de la zone active (Figure 51).

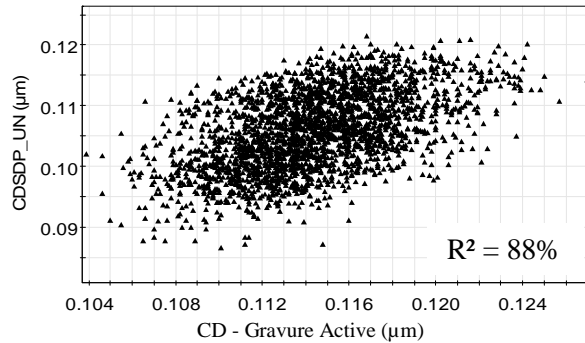


Figure 51. Corrélation entre les dimensions électriques et physiques des zones actives.

Remarque : le pourcentage d'explication est pratiquement égal à 100% et ce, même si seulement 55% de la variabilité de la résistance non silicurée en milieu isolé dopé P+ RSSDP_UN (55%) est expliquée par les mesures physiques. Ainsi la mesure comparative entre les structures de test et de référence permet de s'affranchir des erreurs sur la résistivité liées aux implantations ou aux recuits.

- La largeur électrique de la grille (CDPP_UN) :

Les résultats statistiques montrent que seulement 15% des variations de la largeur électrique de la grille sont expliquées par des variations de Step Height. Dans la première partie de ce chapitre, nous avons montré que les dimensions des motifs en résine utilisés pour définir les zones d'implantation LDD et SD dépendent de la valeur du Step Height. De plus, la structure utilisée pour calculer la largeur électrique de la grille dépend des conditions d'implantations de la source et du drain. Les variations engendrées lors de ces implantations contribuent donc à l'augmentation de la variance des dimensions électriques de la grille.

III.2.c- Mesures électriques caractérisant l'isolation entre les transistors : mesures des tensions de claquage

Certains tests électriques permettent de caractériser la qualité de l'isolation entre les transistors en mesurant la tension de claquage entre des zones dopées.

Paramètres BVNWPW22:

Le paramètre BVNWPW22 caractérise la tension de claquage $(V_{App})_{Claquage}$ d'une jonction p-n polarisée en inverse (Figure 52).

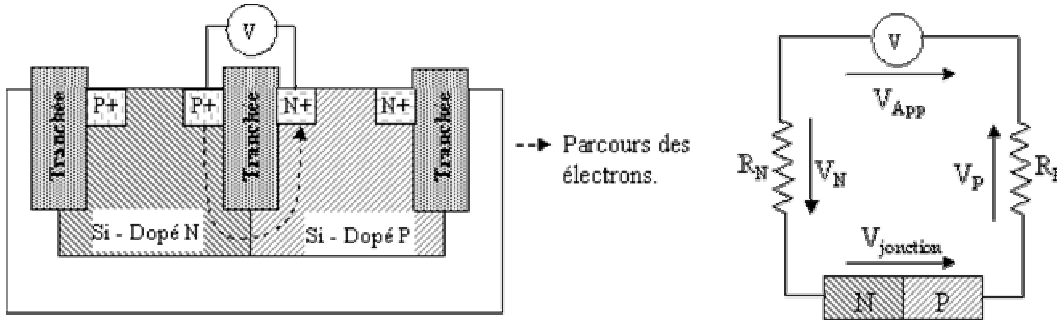


Figure 52. Structure utilisée pour mesurer les tensions de claquage des jonctions p-n sous la tranchée STI. Vue en coupe (a) et représentation électrique (b).

D'après la représentation schématique :

$$V_{App} = V_N + V_{jonction} + V_P$$

- Avec V_{app} : Tension appliquée lors du test,
 V_N : Tension dans le silicium dopé N,
 V_P : Tension dans le silicium dopé P,
 $V_{jonction}$: Tension de la jonction p-n.

Pour atteindre la tension de claquage ($V_{jonction} = V_{Claquage}$), la tension à appliquée doit être égale à :

$$(V_{App})_{Claquage} = V_N + V_P + V_{claquage}$$

Les étapes de fabrication de la brique STI ne jouent pas sur la tension de claquage de la jonction elle-même mais contribuent aux variations des tensions dans le silicium V_N et V_P :

$$V_N \approx \rho_N \cdot L_N$$

$$V_P \approx \rho_P \cdot L_P$$

Les valeurs de résistivité dépendant très fortement du dopage des caissons N et P. Les procédés de la brique STI contribuent seulement aux variations des longueurs L_N et L_P , caractérisant les chemins parcourus par les électrons dans les zones N et P.

L'analyse de corrélation démontre que, dans le domaine de variabilité étudié, seulement 15% de la variabilité de la tension de claquage est liée à 4 paramètres de métrologie du module STI :

- La largeur de la zone active : plus la largeur des zones actives est importante, plus le chemin à parcourir par les électrons est grand donc plus la tension de claquage est grande.
- La profondeur des tranchées d'isolation : ainsi plus la profondeur des tranchées est grande, plus le chemin à parcourir par les électrons est important donc plus la tension de claquage est grande.

- L'épaisseur d'oxyde dans les tranchées après polissage mécano-chimique : plus l'épaisseur d'oxyde dans les tranchées est grande, plus cela signifie que la profondeur des tranchées est grande donc plus le chemin à parcourir par les électrons est important et ainsi plus la tension de claquage est grande.

- L'épaisseur de nitrure après polissage mécano-chimique est très corrélée à l'épaisseur d'oxyde dans les tranchées donc la tension de claquage augmente avec l'épaisseur de nitrure.

Les variations de la tension de claquage non expliquées (soit environ 85%) sont attribuées à la variabilité des conditions d'implantation des caissons NWELL et PWELL.

Paramètre BVNWNW100 :

Le paramètre BVNWNW100 caractérise la tension de claquage entre deux zones N séparées par une zone P. La Figure 53 présente une vue en coupe de la structure de test simplifiée utilisée pour mesurer le paramètre BVNWNW100 caractérisant la tension de claquage entre deux caissons dopés N séparés par une zone dopée P.

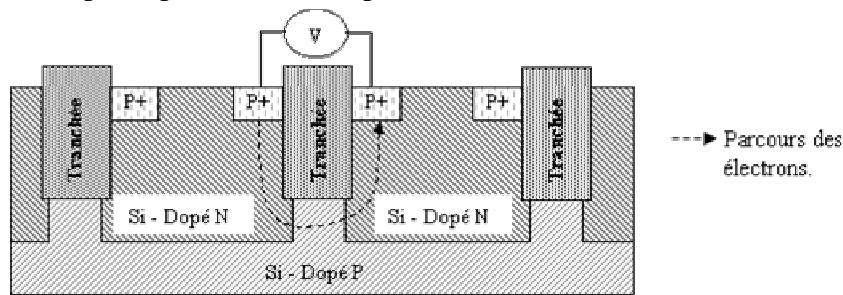


Figure 53. Structure de test employée pour estimer la tension de claquage BVNWNW100 (double jonction p-n).

Les analyses multivariées de corrélations montrent que seulement 3% des variations de ce paramètre électrique sont expliquées par des variations du module d'isolation.

III.2.d- Principales caractéristiques des transistors

Lors des modélisations précédentes, nous avons notamment montré que la topologie des plaques, notamment celle définie par le Step Height, a une influence non négligeable sur les opérations de photolithographie réalisées à posteriori, très sensibles aux couches antérieures. Le Tableau 11 montre qu'environ 10% à 15% des mesures caractéristiques des transistors sont corrélées aux variations de Step Height. En effet, les variations de ce paramètre influent sur les diverses conditions d'implantations des zones actives et par conséquent sur la tension de seuil V_T et les courants Off (IDL) et On (IDS) des transistors. De plus, pour des faibles dimensions de zones actives, l'influence des variations du paramètre "CD - Gravure sèche" est plus important (Figure 54).

En effet, on définit : $I_{DS} \propto \frac{W}{L}$ d'où $\frac{\Delta I_{DS}}{I_{DS}} = \frac{\Delta W}{W} + \frac{\Delta L}{L} + \dots$ Équation 1

Pour un courant I_{DS} et une largeur de grille L constante l'expression 2 devient :

$$\Delta I_{DS} = \left(\frac{\Delta W}{W} + \dots \right) \cdot I_{DS}$$

Pour des zones actives plus faibles, les variations de W ont une influence plus importante sur les performances des transistors (ici le courant I_{DS}):

- Pour $W = 1\mu\text{m}$, les variations des caractéristiques des transistors dépendent peu des variations des dimensions des zones actives. Ces caractéristiques sont alors principalement corrélées aux étapes de fabrication de la grille et aux implantations.
- Pour $W = 0.12\mu\text{m}$, les variations des caractéristiques des transistors dépendent fortement des variations des zones actives.

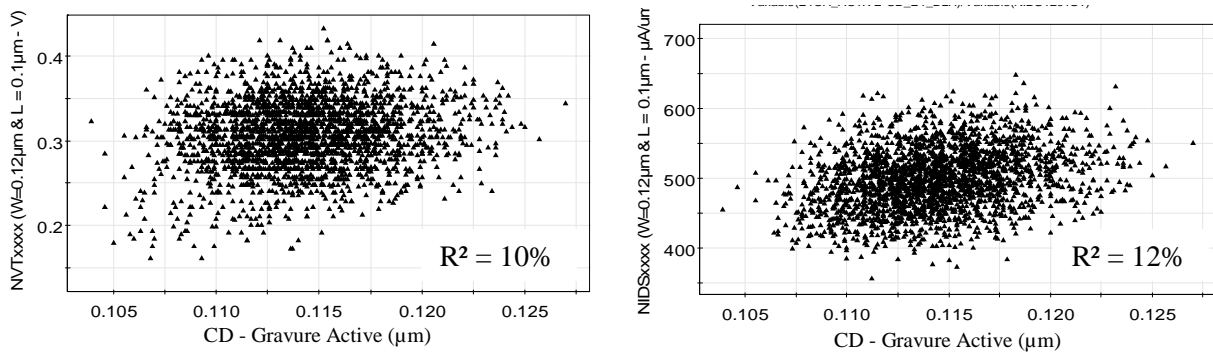


Figure 54. Influence des variations de dimensions des zones actives sur les caractéristiques électriques des transistors de type NMOS à faible largeur de zone active ($W : 0.12\mu\text{m}$).

Dans le quatrième chapitre où nous appliquerons les méthodes d'analyses développées au module de fabrication du transistor, nous confirmerons que certains procédés de fabrication du module grille sont influencés par la topologie définie par le module STI.

III.3- Apport des analyses - Impact des solutions de réduction de variabilité sur les mesures électriques

La méthode d'analyse développée a permis de caractériser l'influence des variations des procédés du module d'isolation sur les principaux paramètres électriques mesurés au sein de la ligne de production. Nous noterons toutefois que le nombre de mesures présentées dans ce manuscrit s'est restreint aux mesures corrélées à au moins 2% avec les mesures physiques effectuées lors du module STI. Les paragraphes suivants présentent les apports de cette étude. En particulier nous montrerons comment ces résultats permettent de quantifier l'impact des solutions de réduction de variabilités, proposées dans le paragraphe précédent, sur la variabilité des mesures électriques.

Dans le chapitre 2-IV, nous avons proposé une solution de réduction de la variabilité du Step Height. Les simulations ont montré qu'une réduction de l'ordre de 40% de cette variabilité était envisageable ; La boucle de régulation proposée permettant de réduire considérablement l'effet lot à lot. Les analyses précédentes ont démontré que plusieurs des mesures électriques étudiées sont corrélées à la hauteur de marche entre les zones actives et non actives. La Figure 55 décrit la nature de la variance de chacun des paramètres électriques corrélés.

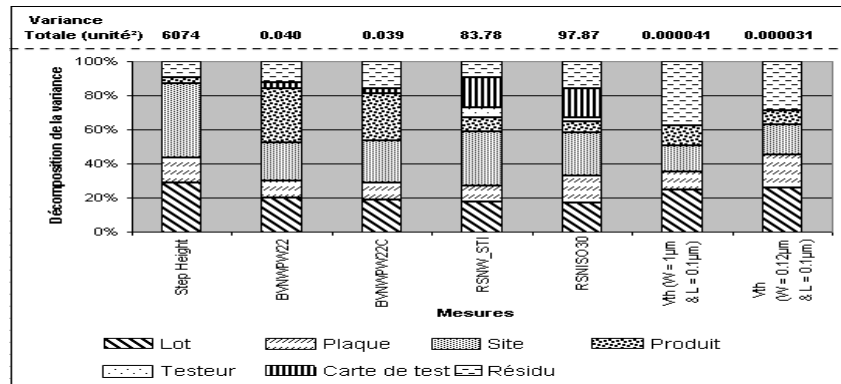


Figure 55. Décomposition de variance des mesures électriques corrélées à la valeur du Step Height.

Une réduction de la variance du Step Height induit une diminution de variabilité sur l'ensemble des paramètres électriques corrélés. Le Tableau 12 présente l'impact de l'application d'une telle boucle de régulation sur les différentes mesures électriques corrélées.

Paramètre électrique	BVNW PW22	RSNW_STI	RNISO30
Gain de variabilité estimé (%)	5 %	7 %	7 %

Paramètre électrique	Courants et tension de seuil pour W = 1µm & L = 0.1µm	Courants et tension de seuil pour W = 0.12µm & L = 0.1µm
Gain de variabilité estimé (%)	5 %	2 %

Tableau 12. Impact de l'implémentation de la boucle de régulation "Gravure ON STI" sur la variabilité des mesures électriques du module STI.

L'analyse des relations entre les mesures physiques du module STI et les résultats électriques ont permis de quantifier l'impact de la variabilité du module d'isolation sur les performances des transistors. L'impact de l'implémentation d'une boucle de régulation Feed Forward au niveau de l'étape de gravure humide sur la variance des mesures électriques a également pu être quantifié.

IV- Modélisation des étapes élémentaires de la brique de procédés STI

Au cours des travaux menés dans le cadre de cette thèse, le système FDC a permis de collecter, pour la quasi-totalité des équipements du site de Crolles 2, les variations de nombreux paramètres des équipements. Les paragraphes suivants s'intéressent à la modélisation des variations observées lors des contrôles de métrologie en fonction des fluctuations de ces paramètres machines. Les informations FDC étant associées aux plaques, les modélisations

effectuées permettront de caractériser les variabilités plaque à plaque ainsi que site à site. Pour le module d'isolation, on distingue 7 types de procédés :

- Les oxydations rapides Pad, Liner et Sacox,
- Les étapes de traitement thermiques dans les fours LPCVD,
- L'opération de photolithographie,
- La gravure des zones actives,
- Le remplissage des tranchées,
- L'étape de polissage mécanico-chimique,
- La gravure Humide ON.

Remarque : les équipements de photolithographie ainsi que les fours LPCVD n'étant pas connectés au système FDC lors de ces travaux (installation des silverboxes en cours d'installation), aucune analyse de corrélation considérant les paramètres de ce type de machine ne sera présentée dans ce chapitre.

IV.1- Modélisation du comportement des procédés d'oxydation rapide - Rapid Thermal Oxidation (RTO)

Dans l'industrie du semi-conducteur, les équipements de type RTP (Rapid Thermal Processing) sont utilisés pour les procédés à haute température comme l'oxydation de surface (RTO), la nitruration (RTN) ou le recuit rapide (RTA) après implantation [GUYRCIK 1993]. Ces équipements monoplaques¹⁴ sont capables d'atteindre des températures élevées (1200°C) en des temps très courts permettant d'assurer des croissances d'oxyde rapides, répétables entre les plaques et uniformes sur la plaque. Trois étapes d'oxydation rapides par thermalisation sous vide sont effectuées lors du module d'isolation :

- L'oxydation Pad : cette étape forme une fine couche d'oxyde intermédiaire entre le silicium massif et le nitrure déposé à posteriori. Cette couche permet de ne pas déformer la structure cristalline du silicium lors du dépôt nitrure (mailles cristallines différentes entre le silicium et le nitrure),
- L'oxydation Liner : cette oxydation permet de "casser l'angle droit" au fond de la tranchée d'isolation afin de limiter l'apparition des trous lors du remplissage,
- L'oxydation Sacox : l'oxydation Sacox protège la surface en silicium lors des implantations fortes énergies des caissons (oxyde sacrificiel).

IV.1.a- Description des équipements et des procédés d'oxydation rapide

Sur le site de Crolles 2, les équipements réalisant les procédés d'oxydation rapide sont fournis par l'équipementier Applied Materials (Figure 56) :

- Les 409 lampes sous vide (~5 torr) réparties en 15 zones sont isolées du reste de la chambre par une fenêtre en quartz,

¹⁴ Equipements capables de traiter une seule plaque à la fois.

- La température est mesurée sur 7 zones de la plaque. Cette mesure est effectuée à l'aide de 7 sondes ou pyromètres optiques [DELFINO 1992]. Le rayonnement émis par la face arrière de la plaque est proportionnel à la température au coefficient d'émissivité ϵ près (théorie du corps noir). Le coefficient ϵ est déterminé à l'aide d'une huitième sonde. Afin de garantir une température uniforme sur la plaque, la température est ajustée en temps réel par l'intermédiaire des puissances des 15 zones de lampes.

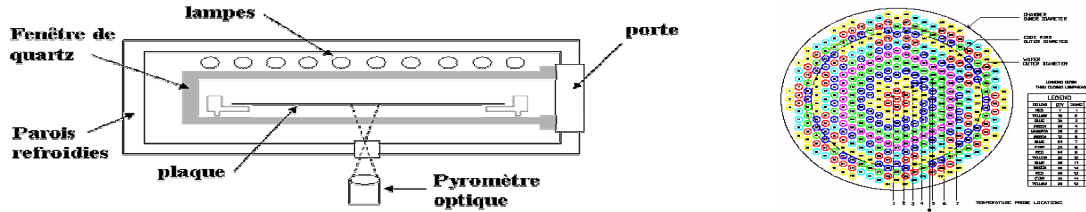


Figure 56. Représentation d'un équipement d'oxydation rapide & répartition des 15 zones de température.

La méthode conventionnelle pour faire croître une couche d'oxyde consiste à placer une surface de silicium sous flux d'oxygène (pur ou en présence du catalyseur H_2). Sur le site de Crolles 2, le principe utilisé est celui par ISSG : "In Situ Steam Generation". L'oxydation se fait à basse pression sous flux de H_2 et O_2 , qui forme de la vapeur in Situ selon la réaction ci-dessous



La croissance d'oxyde en fonction du temps est définie par [SHON-ROY 1998]:

$$(t_{Ox})^2 + A.t_{Ox} = B(t+\gamma)$$

Avec : $A = 2.D_{Oxidant} \left(\frac{1}{k_s} + \frac{1}{h} \right),$

$$B = \frac{2.D_{Oxidant} \cdot C}{N_1},$$

$D_{Oxidant}$: Constante de diffusion de l'oxygène dans SiO_2 ,

k_s : Constante de la réaction chimique à la surface $Si / SiO_2 = k_0 \cdot \exp\left(\frac{-W_A}{k.T}\right),$

k_0 : Constante de la réaction,

k : Constante de Boltzmann ($1,38.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$),

h : Coefficient de transfert de masse dans la phase gazeuse,

C : Solubilité de l'oxygène dans SiO_2 ,

$N_1 = 2,2.10^{22} \text{ cm}^{-3},$

γ : Facteur de correction du à la présence d'oxyde natif à la surface du Si,

t : Temps du procédé,

T : Température de la plaque.

Les épaisseurs d'oxyde étant très faibles, dans la suite de ce manuscrit, on s'intéressera uniquement à la réaction de surface. Par conséquent, le terme A devient $A = (2.D)/k_s$. L'équation de la croissance d'oxyde à l'interface Si/SiO₂ devient alors [LUDSTECK 2004] :

$$t_{ox} = \frac{k_0.C}{N_1} \cdot \exp\left(\frac{-W_A}{k.T}\right)$$

L'équation ci-dessous montre, que pour maîtriser le mécanisme de croissance de l'oxyde, les paramètres suivants doivent être contrôlés :

- La température de la plaque,
- Le flux de gaz : La solubilité C dépend de la quantité de gaz injectée dans la chambre,
- La pression : La solubilité C dépend de la pression de la chambre,
- Le temps du procédé : les procédés utilisés à Crolles 2 sont en temps fixe.

Modélisation de la température de la plaque

La température T de la plaque est définie par [SCHAPER 1992]:

$$T = -A_{Rad}.T^4 - A_{Conv}.(T-Ta) - A_{Cond}.T + B.P$$

- Avec :
- A_{Rad} : Coefficient de radiation de la plaque,
 - A_{Conv} : Coefficient de convection à la surface de la plaque,
 - T_a : Température dans l'enceinte de l'équipement,
 - A_{Cond} : Coefficient de conduction dans la plaque,
 - B : Dépendant du facteur de forme de l'équipement.
 - P : Puissance envoyée aux lampes.

Les coefficients A_{Rad} , A_{Conv} et A_{Cond} dépendent principalement des caractéristiques physiques de la plaque (émissivité, capacité calorifique, masse thermique, surface ...). La température à la surface de la plaque dépend par conséquent :

- De la puissance envoyée par les lampes de chauffe,
- Des dimensions de l'équipement (par l'intermédiaire du facteur de forme B),
- Des caractéristiques des matériaux constituant l'équipement.

Les paramètres collectés par le système ainsi que leur gamme de variabilité durant les procédés de croissance d'oxyde Pad, Liner et Sacox sont présentés en Annexe 1. Ce tableau montre que la température et la pression sont des paramètres régulés pour les procédés de croissance d'oxyde rapide. Par conséquent, afin de mieux caractériser l'influence des variations de procédés, les modélisations prendront en compte également les paramètres d'entrées utilisés pour réguler la température et la pression.

Remarque : aucun paramètre d'entrée régulant le flux de gaz n'est collecté par le système FDC. Nous considérons donc les flux de gaz constants si aucune variation n'est constatée.

IV.1.b- Résultats des analyses de modélisation

Les analyses des procédés d'oxydation Pad, Liner et Sacox montrent que respectivement, 80%, 85 et 60% des variations des moyennes des mesures effectuées après ces procédés sont corrélées à des variations des paramètres équipements (Figure 57).

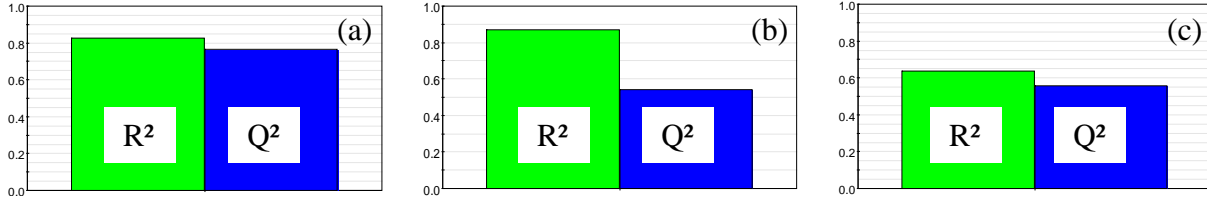


Figure 57. Indicateurs de qualité des modèles statistiques de variations des procédés d'oxydation STI Pad (a), Liner (b) et Sacox (c).

Ces résultats confirment les relations observées lors de l'analyse des corrélations entre les mesures physiques du module STI. En effet, pour chacun de ces 3 procédés, aucune influence d'autres étapes n'avait été constatée sur les épaisseurs d'oxyde mesurées. Les variations de ces mesures proviennent donc directement de la variabilité des procédés de traitement thermique. La Figure 58 présente les principaux contributeurs des variations d'épaisseur d'oxyde après oxydation pad.

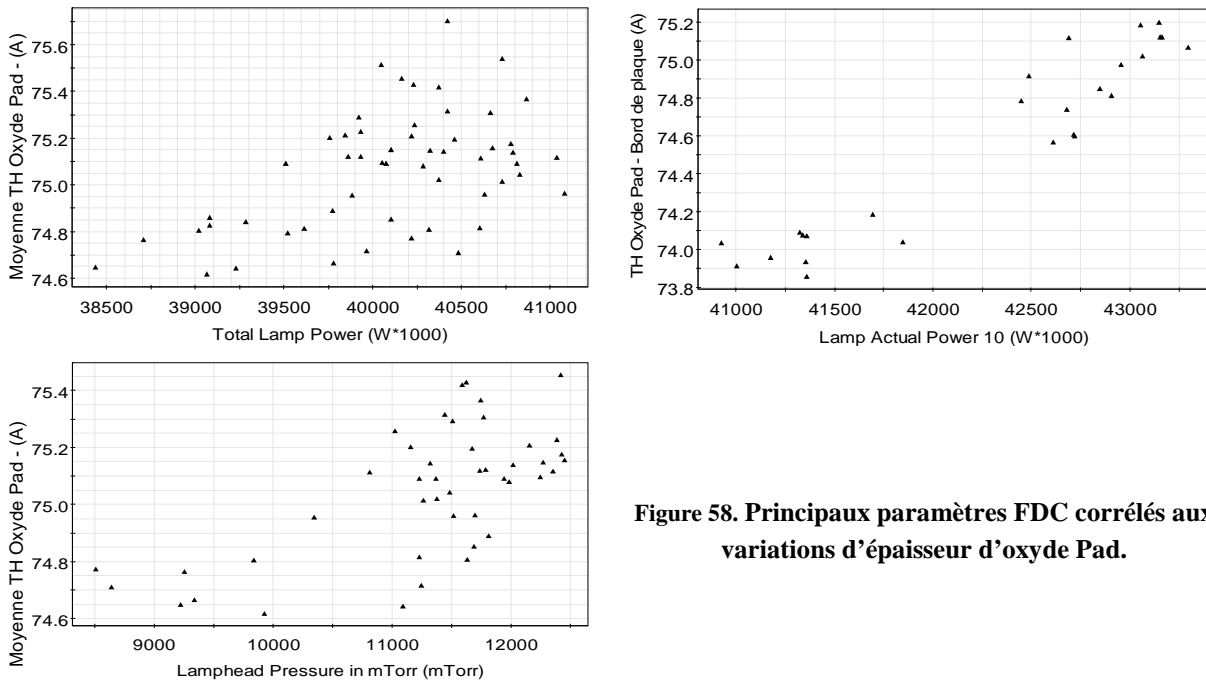


Figure 58. Principaux paramètres FDC corrélés aux variations d'épaisseur d'oxyde Pad.

La puissance totale (Total Lamp Power) envoyée et la pression au niveau des lampes (Lamphead Pressure in mTorr) sont les deux principaux contributeurs de la variabilité de l'épaisseur d'oxyde. La puissance totale envoyée par les lampes reflète la quantité de chaleur reçue par la plaque par radiation. Dans la gamme de variation étudiée, l'augmentation de la puissance totale est principalement due à l'accroissement de la puissance délivrée à la zone 10 (Lamp Actual Power 10). Cette zone de température coïncide avec le bord de la plaque. La Figure

59 démontre que cette augmentation de puissance ($P2 > P1$) induit une augmentation de la croissance d'oxyde au niveau de la zone correspondante.

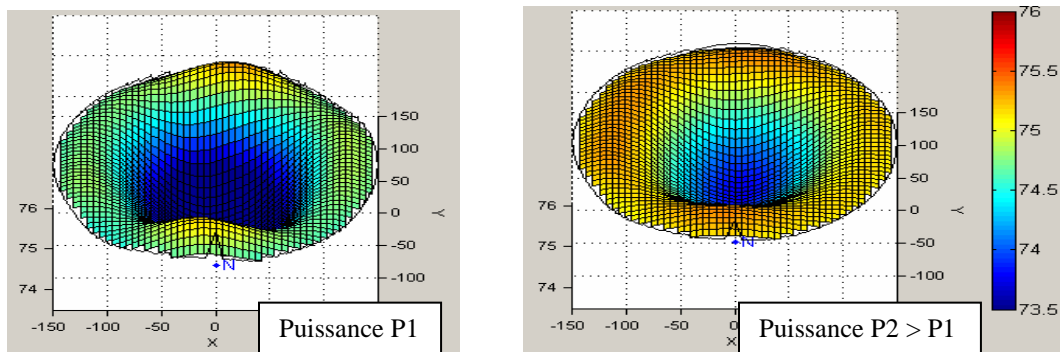


Figure 59. Influence de la puissance délivrée aux lampes du four RTP sur le profil de croissance d'oxyde Pad.

Remarque : les équipements réalisant les 3 oxydations étant les mêmes, les résultats présentés ci-dessus sont transposables aux oxydations liner et sacox.

Les analyses présentées ci-dessus ont permis, en étudiant la variabilité naturelle des plaques de production, de caractériser la pertinence des paramètres FDC collectés durant les étapes d'oxydation : la puissance envoyée aux différentes zones de chauffage ainsi que la pression au niveau des lampes sont les principaux paramètres FDC corrélés aux mesures d'épaisseur d'oxyde. Ces indicateurs sont par conséquent ajoutés au plan de contrôle FDC. La gamme de variabilité de l'épaisseur d'oxyde étant faible par rapport aux spécifications, les limites de contrôle à appliquer aux paramètres FDC choisis sont donc calculées statistiquement ($\pm 3\sigma$ de la variabilité naturelle des plaques).

La mise en place d'un plan d'expérience pourra permettre, dans un second temps, d'augmenter la plage de variabilité des facteurs FDC et de l'épaisseur d'oxyde. Le choix des limites à appliquer aux paramètres FDC pourra alors être basée sur le modèle établi.

IV.2- Modélisation du comportement du procédé de gravure des tranchées d'isolation

Sur le site de Crolles 2, la gravure des tranchées d'isolation est réalisée sur des équipements de gravure de la société Lam Research utilisant la technologie "Transformed Coupled Plasma" (TCP). Les analyses de modélisation présentées dans le paragraphe III.2.a- ont démontré que respectivement 43% et 12% des variations de la dimension des motifs et de la profondeur de tranchée sont corrélées à des variations des étapes précédentes. Dans ce paragraphe, nous nous proposons de comprendre les variations non expliquées à l'aide des paramètres FDC collectés.

IV.2.a- Présentation de l'équipement de gravure plasma TCP

La technologie TCP (Figure 60) est employée pour les gravures du silicium (Front-end : grille, STI, espaceur nitrure) et du métal (Back-end).

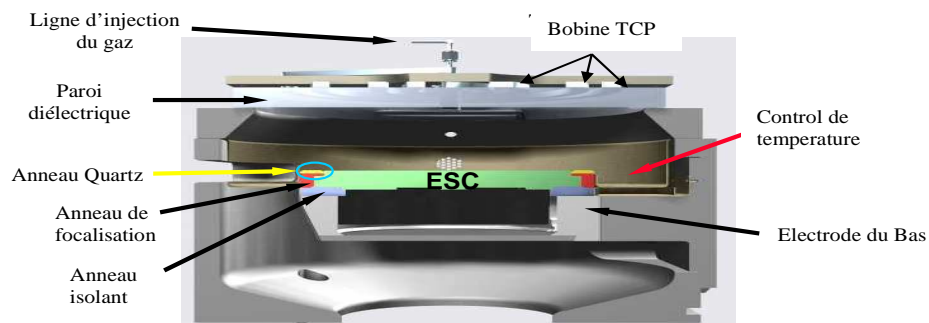


Figure 60. Représentation d'une chambre de gravure de type TCP.

L'énergie électromagnétique envoyée par le générateur sur la bobine TCP est délivrée au plasma à travers une paroi diélectrique créant ainsi un plasma haute densité. La partie basse de la chambre comprend le chuck auquel une puissance RF est appliquée pour accélérer des ions dans la gaine RF par couplage capacitif entre le chuck et le plasma. L'accord d'impédance est réalisé par l'intermédiaire d'une boîte d'accord contenant des bobines et des capacités.

Pour un équipement de gravure plasma de type TCP, les paramètres clés du plasma sont la densité du plasma et le taux de collision des électrons. Ces deux paramètres dépendent [EICHHORN 2005] :

- De la densité des gaz,
- De la composition des gaz,
- De l'état des parois,
- De la puissance RF appliquée aux bobines TCP,
- De la pression dans la chambre,
- De l'état de surface de la plaque.
- Du champ magnétique dans le plasma,
- De la température des gaz,
- De la température de la chambre,
- De l'état de surface de la plaque.

Ainsi, pour un contrôle optimal des performances d'un procédé de gravure par plasma, il est nécessaire de contrôler chacun de ces paramètres. La gamme de variations de chacun des paramètres collectés par le système FDC durant le procédé de gravure des zones actives est présentée en Annexe 2. Nous remarquerons qu'aucun de ces paramètres n'est directement relié :

- A la composition et à la densité des gaz,
- A l'état des parois,
- A l'état de surface de la plaque.

Une variation de l'un de ces quatre facteurs ne pourra être détectée par le système FDC.

IV.2.b- Modélisation des variations des dimensions des motifs gravés en fonction des paramètres équipements

Les modèles obtenus expliquent 11% et 12% respectivement des variations des paramètres "CD - gravure sèche" et "profondeur de tranchée". La très faible qualité des modèles confirme les hypothèses précédemment énumérées à savoir que les paramètres collectés ne permettent pas d'expliquer l'ensemble des variations des dimensions des motifs gravés [KOGELSCHATZ 2004]. Par conséquent, les paramètres contrôlés par le système FDC sont aujourd'hui choisis en fonction de la connaissance des ingénieurs. Les limites appliquées sur ces paramètres sont calculées statistiquement.

Dans la suite de ce manuscrit, nous étudierons plus précisément l'impact des principaux paramètres du plasma à travers l'analyse d'un plan d'expérience.

IV.3- Modélisation du du procédé de Dépôt Chimique en phase Vapeur - CVD

Le remplissage des tranchées d'isolation est réalisé par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) utilisant la technologie HDP (High Density Plasma).

IV.3.a- Présentation du procédé de Dépôt Chimique en phase Vapeur - HDP

Durant ce procédé, le plasma est créé à basse pression par couplage inductif (Figure 61).

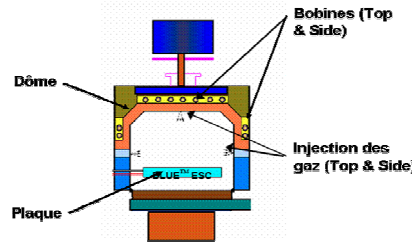


Figure 61. Représentation schématique d'un équipement de HDP CVD.

Le procédé de dépôt chimique en phase vapeur se décompose en 5 mécanismes indépendants [CHANG 1993] :

- 1- La réaction chimique à la surface entre les espèces neutres du plasma selon la réaction (mécanisme prédominant) :



Le modèle de déposition de SiO_2 développé par Grove [WOLF 2000] est défini par :

$$G = \frac{k_s \cdot h_g}{k_s + h_g} \cdot \frac{C_T}{N_1} Y$$

Avec G : Taux de croissance de l'oxyde,

k_s : Constante de réaction chimique à la surface. $k_s = k_0 \cdot \exp\left[\frac{-W_A}{k.T}\right]$,

k_0 : Constante de la réaction,

- k : Constante de Boltzmann ($1,38.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$),
h_g : Coefficient de transfert de masse en phase gazeuse,
C_T : Nombre total de molécules par cm³ dans la phase gazeuse,
N₁ : 5.10^{22} atomes / cm³,
Y : Fraction molaire de l'espèce réactive. Dans notre cas, ce nombre représente le pourcentage de molécules neutres dans le plasma. On définit le nombre de molécules neutres $n = \frac{\text{Pression}}{k.(\text{Température})_{\text{du gaz}}}$.

Les relations physiques établies démontrent que pour un contrôle optimal du procédé de CVD, il incombe de détecter les variations de densité électronique des espèces en maîtrisant :

- La pression dans la chambre,
 - Les puissances RF Top & Side (Figure 61),
 - Les différents flux de Gaz,
 - La température.
- 2- Le dépôt induit par les espèces ioniques. Ce mécanisme est principalement gouverné par la densité des espèces ionisées dépendant :
- De la pression dans la chambre,
 - Des puissances RF Top, Side & Bias.
 - Des flux de Gaz,
- 3- Le mécanisme de pulvérisation (gravure des espèces déposées) principalement corrélé à la densité des espèces ionisées ainsi que de leur énergie (contrôlée par la puissance Bias),
- 4- La re-déposition directe des espèces engendrée par la pulvérisation,
- 5- La re-déposition indirecte des espèces engendrée par la pulvérisation.

Afin d'éviter la création de trous (ou voids) lors du procédé, le remplissage est réalisé en deux étapes : une première étape (numéro de l'étape dans la recette de fabrication : 11) à fort taux de déposition (flux de SiH₄ élevé et puissance Bias faible) et une seconde (numéro de l'étape dans la recette de fabrication : 12) favorisant la pulvérisation (flux de SiH₄ faible et puissance Bias élevée). Les mesures physiques effectuées en production caractérisent ces deux phénomènes.

La gamme de variations des paramètres de l'équipement suivis lors de ces deux étapes du procédé CVD est présentée en Annexe 3. Nous noterons que les paramètres de contrôle de la pression, des flux de gaz ainsi que de la température sont des paramètres régulés. Comme lors des modélisations précédentes, nous ferons l'hypothèse qu'aucune décalibration des capteurs ne se produit.

IV.3.b- Modélisation de la variabilité naturelle du procédé de CVD

Les analyses de corrélation entre les différentes mesures physiques (III.2.a-) montrent que seulement 8% des variations de l'épaisseur de SiO₂ après remplissage des tranchées sont attribuées aux variations d'étapes précédentes. D'autre part, les analyses de variances démontrent une importante variabilité intra- plaque (contribution de l'ordre de 45%- Figure 42).

Les modélisations entre les mesures physiques et les paramètres FDC indiquent que respectivement 74 % et 48% de la variabilité de l'épaisseur d'oxyde moyenne après remplissage et de son écart type sont corrélées à des variations de paramètres équipements. Les principaux paramètres contributeurs des variations d'épaisseur d'oxyde sont :

- Pour la moyenne (Figure 60) : La valeur moyenne de la pression dans la chambre pendant l'étape 11 (Pressure reading_11_AVG) et la température moyenne au niveau de la plaque pendant l'étape 12 (Wafertemp_12_AVG). Les relations ci-dessous confirment les relations physiques précédemment décrites ; la pression impacte fortement la densité des espèces neutres dans le plasma alors que la température de la plaque influence la réaction chimique à la surface.

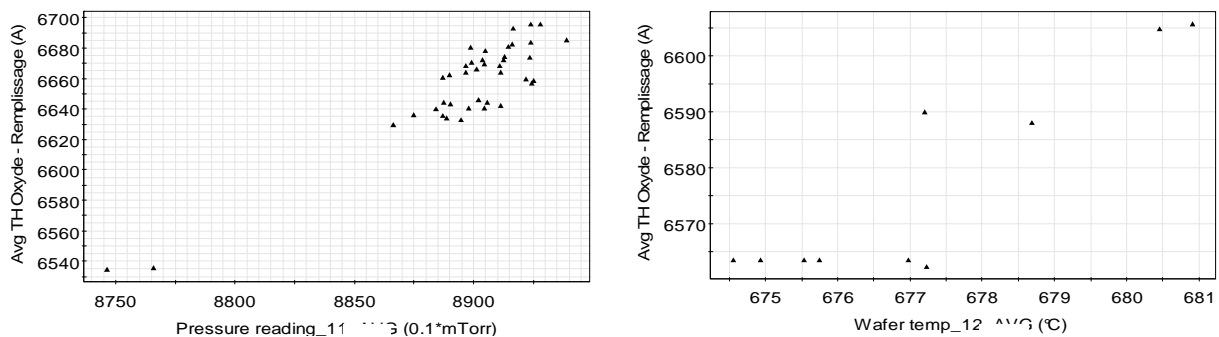


Figure 62. Influence de la pression¹⁵ et de la température pendant le procédé CVD STI sur l'épaisseur d'oxyde moyenne déposée (le graphique (b) est réalisé sur un sous ensemble de la population afin de mieux percevoir la corrélation).

- Pour la dispersion intra-plaque : la pression moyenne du procédé ainsi que la température moyenne du SIDE (Dome Heaterzone temperature SID_11_AVG) pendant l'étape 11 (Figure 63). Une diminution de la pression s'accompagne d'une augmentation de la dispersion intra- plaque.

¹⁵ « Pressure reading_11_AVG » signifie valeur moyenne du paramètre « Pressure reading » pendant l'étape 11 du procédé de CVD.

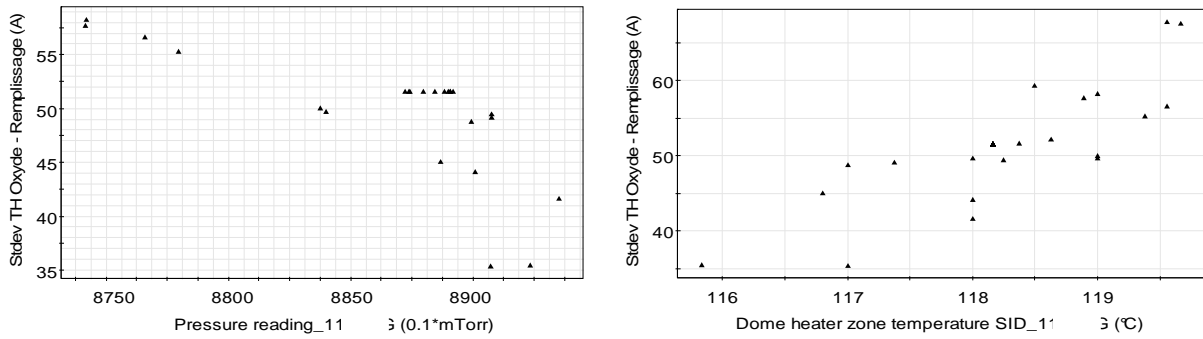


Figure 63. Influence de la pression et de la température SIDE pendant le procédé de CVD STI sur la dispersion intra-plaque d'oxyde déposé.

Dans la gamme de variabilité des paramètres équipements étudiée, la température SIDE du dôme influe significativement sur la dispersion intra- plaque. La Figure 64 représente la reconstruction de la surface pour des plaques à faible et forte dispersion d'épaisseur d'oxyde. La principale variation se situe au niveau du bord de la plaque confirmant physiquement la corrélation entre l'épaisseur déposée et la température SIDE du dôme.

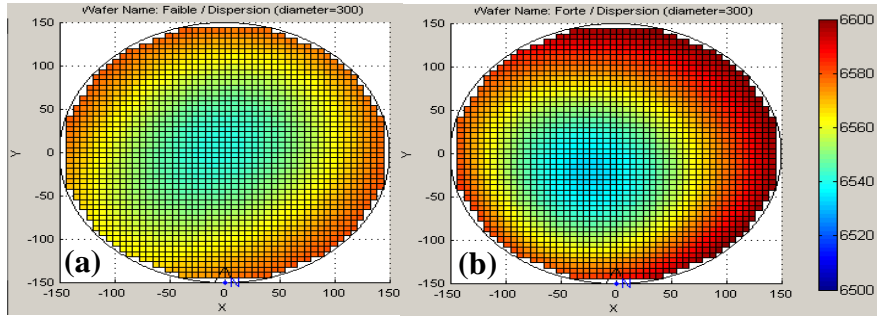


Figure 64. Profil de l'épaisseur d'oxyde déposée après CVD STI correspondant à une faible (a) et à une forte dispersion (b).

IV.3.b- L'apport des plans d'expériences pour la modélisation de l'influence des paramètres FDC réglés sur les mesures physiques sur les plaques

Pour le procédé CVD, les paramètres FDC collectés sont principalement réglés. L'analyse des mesures de production ne permet pas de quantifier l'impact des variations de ces paramètres sur les résultats physiques finaux. La mise en œuvre d'un plan d'expérience - ou DoE - permet de caractériser ces influences (la matrice du DoE est appliquée à la première étape de déposition). Afin d'obtenir une modélisation la plus complète possible, les valeurs de déposition et de pulvérisation seront mesurées. Le Tableau 13 présente la gamme de variations des différents paramètres imposée par le DoE en regard avec celle des données sur les lots de production.

	Puissance RF Top (W)	Puissance RF Side (W)	Puissance RF Bias (W)	Flux de SiH Top (W)	Flux de SiH Side (W)
Min DoE	6300	2800	2400	26	85
Max DoE	6700	3200	2800	35	105
Min Plaques de production	6494.3	2997.4	2679.9	30.8	87.5
Max Plaques de production	6499.8	3010.2	2727.2	30.9	88.0

Tableau 13. Comparaison de la variabilité des paramètres FDC (CVD STI) entre les mesures de production et le plan d'expérience réalisé.

Ce tableau montre effectivement l'intérêt des plans d'expérience qui permettent d'augmenter considérablement la variabilité des paramètres.

Modélisation statistique entre les paramètres du DoE et les mesures physiques

La Figure 65 représente le pareto d'influence de chacun des paramètres du DoE sur les mesures physiques effectuées (les abscisses représentent l'importance des effets). L'analyse souligne l'importance du contrôle des puissances RF Bias, Top & Side, des flux de gaz ainsi que de la pression afin de garantir une bonne stabilité de l'épaisseur déposée.

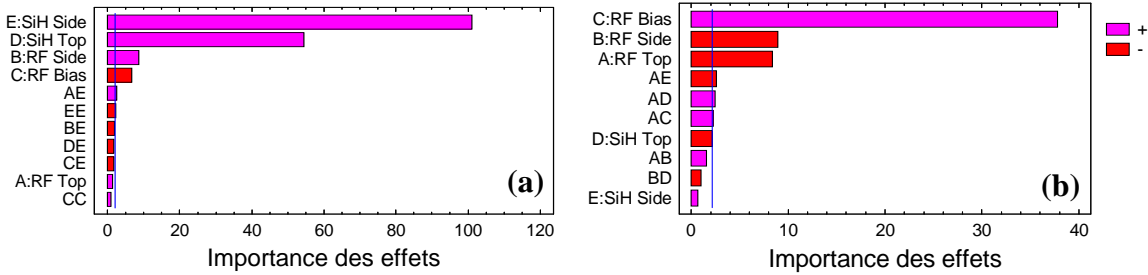


Figure 65. Analyse du plan d'expérience du procédé de dépôt Chimique en Phase Vapeur - HDP STL. (modélisation de la déposition $-R^2=0.912$ (a) et de la pulvérisation $-R^2=0.989$ (b)).

Le flux de gaz SiH₄ Side est le principal contributeur des variations de la déposition : celle ci augmente avec le flux de gaz SiH₄ car on introduit plus d'espèces dans le réacteur.

La pulvérisation augmente également avec la puissance Bias (appliquée à la place) : une puissance importante induit un fort bombardement de la plaque et par conséquent une grande pulvérisation. Par contre, la pulvérisation augmente si les puissances RF Side et Top diminuent. Physiquement, plus celles-ci augmentent, plus le bombardement de la plaque est réduit.

Utilisation des modèles statistiques établis pour l'amélioration du plan de contrôle FDC

Le Tableau 14 présente les paramètres équipements directement ou indirectement corrélés aux variations des paramètres du plan d'expérience.

Paramètres du plan d'expérience	Paramètres de l'équipement directement corrélés	Paramètres de l'équipement indirectement corrélés
Puissance RF Top	RF Top forward power	
Puissance RF Side	RF Side forward power	
Puissance RF Bias	RF Bias forward power	wafer temp dome heater zone temperature TOP
SiH Top	flow8 reading	
SiH Side	flow5 reading	flow1 reading pressure reading foreline pressure RF Side reflected power

Tableau 14. Variables équipements corrélées aux paramètres du plan d'expérience CVD STL.

L'analyse du comportement des paramètres équipement en fonction des conditions expérimentales du plan d'expérience démontre que chaque facteur du plan est corrélé à au moins une variable de l'équipement. Nous remarquons :

- Qu'une augmentation de la puissance RF Bias se traduit par une augmentation du bombardement de la plaque par les espèces ionisées ; Cela s'accompagne par une élévation la valeur moyenne ainsi que l'écart type de la température de la plaque et du dome_Top,
- Que des variations du flux de SiH₄ Side influent sur la pression dans la chambre et au niveau de l'extraction des gaz. La puissance réfléchi se trouve également affectée par des fluctuations du flux SiH₄. Afin de garantir des performances du procédé optimum, le ratio entre le flux de SiH₄ et d'O₂ doit être constant (≈ 2.2 dans notre cas) ; Cela explique la relation des flux de O₂ et de SiH₄.

IV.3.d- Apport des modélisations – Optimisation du plan de contrôle du procédé de CVD

Les analyses de modélisation ont permis :

- De déterminer les causes de variations de l'épaisseur d'oxyde mesurée après remplissage en analysant les mesures sur les plaques de production. Ces relations nous permettent de déterminer précisément les limites de contrôle à appliquer sur chacun de ces paramètres (Tableau 15).

Paramètres des équipements FDC			Pressure reading (0.1*mTorr)	Dome heater zone temperature TOP (°C)	Wafer temp (°C)	Dome heater zone temperature SID (°C)
Contrôle - SPC						
Moyenne – TH Oxyde - Remplissage	Limite de contrôle basse	6525 Å	8700	121	670	
	Limite de contrôle haute	6675 Å	8950	123	685	
Dispersion intra plaque – TH Oxyde - Remplissage	Limite de contrôle basse	24 Å	8700			115
	Limite de contrôle haute	60 Å	9000			120

Tableau 15. Limites de contrôle FDC proposées pour le procédé CVD STL.

- De quantifier l'influence des paramètres régulés sur les résultats physiques par l'intermédiaire d'un plan d'expérience. Cette modélisation permet de déterminer les paramètres FDC correspondant à contrôler ainsi que les limites associées.

IV.4- Modélisation du comportement des procédés de polissage mécanico-chimique

Le module d'isolation comporte une étape de polissage mécanico-chimique. Pour la technologie C090, ce procédé permet de polir environ 2300Å d'oxyde par polissage successif sur 3 plateaux. Les analyses de corrélations effectuées entre les mesures physiques du module STI ont précédemment montré qu'environ 75% des variations des épaisseurs d'oxyde et de nitrure après polissage sont dues au procédé de fabrication lui-même (25% des variations sont expliquées par des opérations antérieures). Dans cette partie, nous nous proposons de caractériser la variabilité due à l'équipement de polissage.

IV.4.a- Présentation de l'équipement de Polissage mécanico-chimique

Un équipement de polissage est constitué de 2 éléments : la machine de polissage et la station de nettoyage des plaquettes (Figure 66).

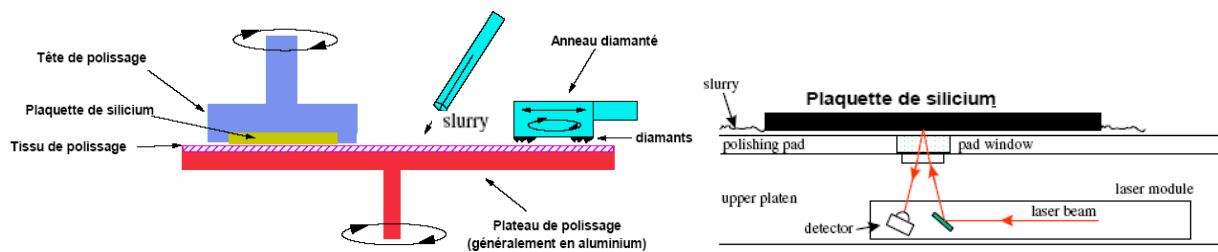


Figure 66. Représentation d'un équipement de polissage mécanico-chimique.

Les plaques sont chargées progressivement sur les 4 têtes. Chaque plaque est polie sur les trois plateaux représentant les trois étapes de polissage pour ensuite passer dans le Cleaner. Les plaques sont déplacées de manière séquentielle dans les différentes stations de nettoyage. Dans ce manuscrit, nous n'étudierons que les variations du procédé de polissage.

Une tête est constituée des parties suivantes :

- Un anneau de garde retient la plaque (retaining ring),
- Une membrane souple est décomposée en 3 zones circumférentielles de pression :
 - o Zone 1 : 0 mm à 120 mm,
 - o Zone 2 : 120 mm à 140 mm,
 - o Zone 3 : 140 mm à 150 mm.

La pression est réglable sur les trois zones, ce qui permet de mieux contrôler les variations le profil intra plaque du polissage. Le mouvement rotatif du plateau et de la tête ainsi que le balayage de la tête sur le plateau sont optimisés pour obtenir un polissage uniforme.

Le revêtement du plateau (Pad) se compose d'une partie dure en polyuréthane poreux posé sur un matériau mou. Des rainures sont dessinées à la surface pour faciliter le transport de la chimie abrasive ou slurry. Un avivage du pad est nécessaire avant et pendant le polissage. Ce rôle est tenu par un système de conditionnement (Disque diamanté - Diamond Disk) qui frotte la surface pour nettoyer les pores tout en avivant le tissu de polissage. L'avivage du tissu abrasif est

nécessaire pour avoir une surface renouvelée constante et pour obtenir une bonne reproductibilité du procédé de polissage.

La partie chimique du polissage est assurée par le slurry qui peut être distribué à différents endroits à la surface du Pad. Dans le cas du polissage intervenant lors de l'élaboration des tranchées, un distributeur dispense à la surface du pad 2 chimies différentes selon le plateau. Le Tableau 16 expose la configuration des procédés effectués sur les 3 plateaux :

- Le plateau 1 effectue une planarisation du profil d'oxyde sur la plaque,
- Le plateau 2 permet d'obtenir une épaisseur d'oxyde dans les tranchées de l'ordre de 4200 Å. La fin de cette étape est définie par un système de détection de fin d'attaque (Endpoint) qui mesure en continue, à l'aide d'un faisceau laser, l'épaisseur d'oxyde restante.
- Le polissage sur le plateau 3, plus lent que les autres, influe sur la défektivité liée au procédé.

Plateau	Type de Procédé	Vitesse de polissage (Oxyde)	Pad	Contrôle de fin d'étape	Type de Slurry
1	Planarisation		IC1010	Temps fixe	Ekc
2	Polissage	20Å / sec	IC1010	Endpoint	Kleb
3	Polissage	7Å / sec	Politex	Temps Fixe	Kleb

Tableau 16. Récapitulatif de la configuration des procédés sur les 3 plateaux de CMP STI.

IV.4.b- Paramètres du procédé de polissage mécanico-chimique

La vitesse relative \vec{V} entre la plaquette et le tissu de polissage au point P de la tête est définie par :

$$\vec{V} = \vec{\omega}_{Plateau} \wedge \vec{d}_{P-T} + (\vec{\omega}_{Plateau} - \vec{\omega}_{Tête}) \wedge \vec{d}_{T-P}$$

Avec d_{P-T} : Distance entre le centre du plateau et le centre de la tête,
 d_{T-P} : Distance entre le point P et le centre de la tête.

D'un point de vue macroscopique, la relation entre la vitesse d'attaque du procédé de polissage mécanico-chimique VA et la vitesse relative entre le tissu et la plaquette V s'écrit :

$$VA = K_p \cdot P_0 \cdot V \quad \text{Avec } P_0 : \text{pression de polissage,}$$

$$K_p : \text{constante de Preston.}$$

La constante de Preston K_p regroupe toutes les influences provenant des phénomènes microscopiques et nanoscopiques [PERRIN, 2000]. Elle dépend du diamètre des particules abrasives, de la structure du tissu de polissage et de la chimie de l'abrasif.

L'épaisseur de matériau poli est défini par :

$$E_{\text{Enlevée}} = VA.t \quad \text{Avec } t : \text{ temps du polissage.}$$

En utilisant le principe du modèle des volumes [PERRIN, 2000], l'épaisseur finale après polissage sera donc égale à :

$$E_{\text{Finale}} = E_{\text{Initiale}} - E_{\text{Moyenne Enlevée}} - 1(1-\rho).Hi \quad \text{Avec } Hi : \text{ hauteur des tranchées,}$$

ρ : densité du matériau à polir

Pour résumé, la vitesse de polissage mécanico-chimique dépend des facteurs suivants :

- Consommables :
 - o Slurry,
 - o Tête de polissage,
 - o Qualité du Pad,
 - o Usure des disques de diamant.
- Pression appliquée à la tête de polissage,
- Vitesses du plateau et de la tête de polissage,
- Matériau à polir :
 - o Epaisseur du matériau,
 - o Composition chimique,
 - o Densité du matériau.
- Type de substrat,
- Temps de polissage.

Les paramètres des équipements de polissage sont exposés en Annexe 4. Les informations décrivant le matériau à polir ne sont pas collectées par les silverboxes.

IV.4.c- Modélisation du comportement du procédé de polissage STI

L'analyse de variance présentée dans la partie II.4- montre que la conjugaison des effets lot à lot et plaque à plaque contribue à hauteur de 40% à la variabilité des mesures post polissage. Les modélisations avec les paramètres FDC montrent que, dans le domaine de variabilité considéré, 58% des variations lot à lot et plaque à plaque des épaisseurs d'oxyde et de nitrure après polissage sont expliquées par des variations des paramètres des équipements (soit $40\% * 58\% \approx 24\%$ de la variabilité totale). 52% de la dispersion intra-plaque est également expliquée à l'aide des paramètres FDC collectés.

Ces résultats montrent donc que 42% des variations inter-lot et intra-lot ne sont expliquées ni par les mesures physiques précédentes, ni par les paramètres collectés pendant le polissage. Cela s'explique :

- Par un manque de pertinence des paramètres équipements collectés. Un grand nombre de paramètres collectés sont des paramètres régulés. En cas de décalibration des capteurs, les informations collectées peuvent s'avérer faussées.
- Par des variations du recuit de densification de l'oxyde après remplissage des tranchées. Un matériau moins dense sera plus mou et donc plus facile à polir.

Le principal paramètre expliquant les variations de moyenne et de dispersion intra-plaque de l'épaisseur est l'usure des consommables et plus particulièrement l'usure des plateaux 2 (paramètre FDC : Pltn2 Usage) et 3 (paramètre FDC : Pltn3 Usage).

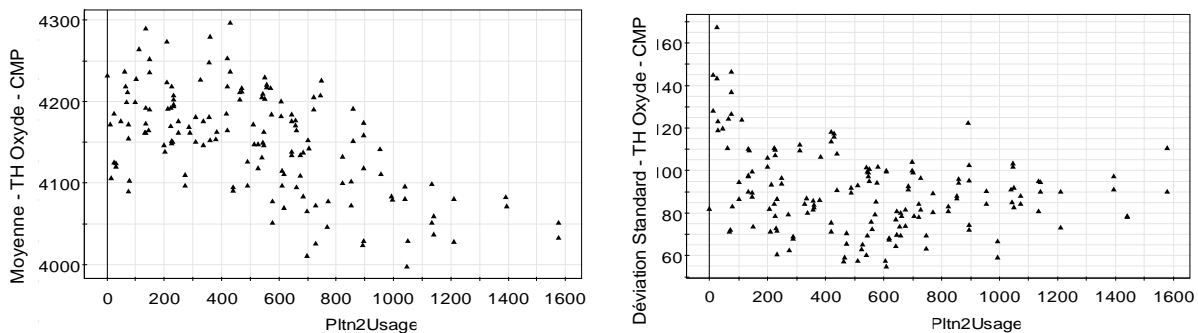


Figure 67. Influence de la durée de vie des consommables du plateau 2 sur la stabilité du procédé de polissage STI.

Les plateaux 2 et 3 sont toujours changés au même instant. Par conséquent, il est impossible de déterminer physiquement lequel est responsable des variations en valeur moyenne et en écart type. Basées sur ces résultats, des expériences supplémentaires ciblées ont permis de mettre en évidence que :

- L'usure du plateau 2 influe sur la dispersion intra plaque. L'amélioration de cette dispersion en fonction de la durée de vie est due à la diminution de l'effet bord-centre ; Pour une faible usure (<100 plaques), le polissage au centre de la plaque est beaucoup plus important qu'au bord. La Figure 68. représente cet effet après reconstruction de surface par modélisation neuronale.

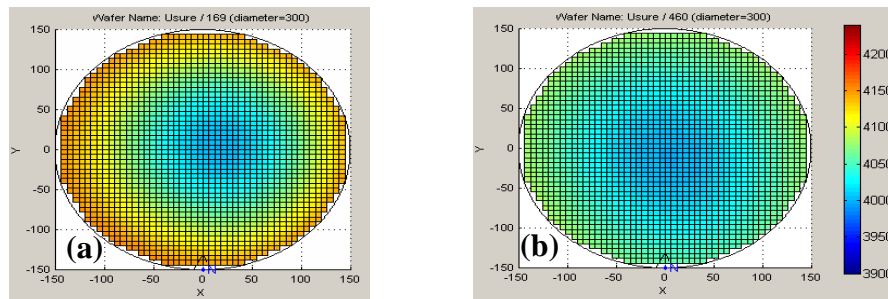


Figure 68. Influence de l'usure du plateau de polissage STI sur la dispersion intra-plaque de l'oxyde poli. Reconstruction de surface pour une faible (a) et une importante (b) dispersion.

- L'usure du plateau 3 est responsable de la variabilité de la valeur moyenne des épaisseurs d'oxyde et de nitrure. Comme l'étape de procédé sur ce plateau est en temps fixe, à pressions et à vitesses constantes, l'état du plateau et donc l'usure ont une grande influence.

L'ensemble des analyses effectuées sur les sources de variation des mesures post polissage montre que la modélisation des épaisseurs d'oxyde et de nitrure peut se réduire, dans la gamme de variabilité étudiée, à une fonction du type :

$$TH_{\text{Oxyde, Nitrure}} = f(\text{TH Oxyde - Remplissage, Pltn2 Usage, Pltn3 Usage})$$

IV.4.d- Apport des modélisations – Optimisation du plan de contrôle du procédé de CMP

Les analyses de modélisation ont permis de mettre en évidence les principaux contributeurs des variations d'épaisseur d'oxyde et de nitrure post polissage :

- Les relations établies procurent une aide précieuse pour estimer les limites à appliquer en FDC. Dans le cas du polissage STI on en déduit :

	SPC		FDC
	Moyenne - TH Oxyde - CMP (Å)	Moyenne - TH Nitrure - CMP (Å)	Pltn3_Usage (Nb plaques)
Limite de contrôle haute	4320	890	1400
Limite de contrôle basse	3980	750	0

Tableau 17. Limites de contrôle FDC proposées à partir des modélisations du procédé de CMP STI.

Le maximum de dispersion intra-plaque étant obtenu pour des faibles usures de consommables (pièces s'usant au cours de la vie de l'équipement et régulièrement changées), les limites de contrôle FDC ne peuvent pas être appliquées.

- L'importance de l'usure des consommables sur les moyennes et l'écart type des épaisseurs restantes permettent d'envisager l'implémentation d'une boucle de régulation Feed Forward. Cette boucle propose un temps de polissage à appliquer sur le plateau 3 en fonction de l'usure du plateau afin de diminuer la dispersion lot à lot. La Figure 69 présente les résultats de simulation de l'implémentation d'un tel asservissement. Les simulations mettent en évidence un gain possible de l'ordre de 60% de la variabilité entre les lots de production.

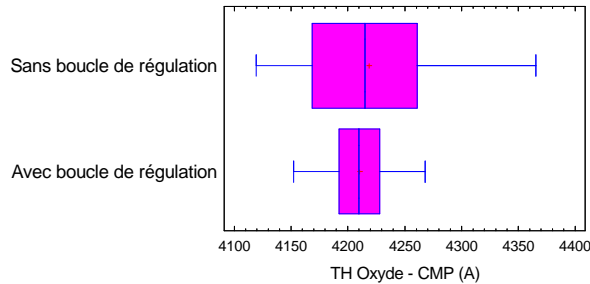


Figure 69. Apport simulé de l'implémentation d'une boucle de régulation au niveau polissage STI.

Les corrélations établies entre les mesures physiques et les paramètres FDC collectés lors du polissage ont permis de souligner l'influence de la durée de vie des consommables. Les résultats de modélisation nous ont amenés à calculer les limites de contrôle à appliquer aux paramètres FDC ainsi qu'à proposer une solution de régulation du procédé de polissage basé sur l'âge des consommables.

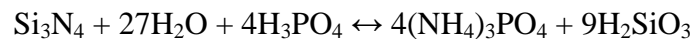
IV.5- Modélisation du comportement du procédé de gravure humide

Les analyses de modélisation entre les mesures physiques ont démontré que 85% de la variabilité du Step Height est corrélée aux variations d'opérations de fabrication précédentes. Parmi ces 85%, 7% environ sont corrélées aux fluctuations du procédé de gravure humide. Dans ce paragraphe, nous nous proposons de modéliser les variations de mesures de l'épaisseur d'oxyde après gravure humide à l'aide des paramètres de l'équipement correspondant.

IV.5.a- Description du procédé de Gravure humide ON

Pour la technologie 90nm, l'étape de gravure humide ON¹⁶ est réalisée dans des bains de HF et de H₃PO₄. Cette opération se décompose en 2 étapes principales :

- La gravure d'une fine couche d'oxyde par immersion dans un bain de HF (concentration de HF = 0.1%). Cette étape permet d'enlever les résidus d'oxyde présents sur le nitrure après polissage et d'éventuellement ajuster la hauteur d'oxyde dans les tranchées,
- La gravure du nitrure par immersion dans un bain de H₃PO₄ 80% retire la totalité de la couche de nitrure selon l'équation chimique suivante :



Cette étape est effectuée à haute température (typiquement 150-160°C – Proche du point d'ébullition de H₃PO₄) pour garantir une vitesse d'attaque élevée. L'équation chimique précédente montre que du SiO₂ hydraté se forme lors de la réaction. Ce phénomène explique la sélectivité de la solution (saturée en SiO₂) par rapport à l'oxyde présent sur la plaque.

- Des opérations de nettoyage sont effectuées entre ces différentes étapes.

La gravure du nitrure par H₃PO₄ étant très sélective par rapport à l'oxyde (vitesse d'attaque égale à 100Å/min pour Si₃N₄ et 0-25 Å/min pour SiO₂), la première étape est primordiale pour ne pas avoir de résidu de nitrure en toute fin de procédé. Les études montrent que la sélectivité du H₃PO₄ dépend de la vie du bain : un nouveau bain présentera une sélectivité plus importante [CALVIER 2005]. Le domaine de variations de l'ensemble des paramètres collectés durant la gravure humide est présenté en Annexe 5.

Les modélisations montrent que 60% de la variabilité lot à lot de la mesure après gravure humide est expliquée à l'aide des paramètres FDC. Le principal contributeur de ces variations est le vieillissement du bain de H₃PO₄ (paramètres FDC : POS07_ChemicalLifeTime & POS07_ChemicalLifeCount). Cette évolution de la vie du bain engendre des variations pouvant aller jusqu'à 30% (Figure 70).

¹⁶ Gravure Oxyde et Nitrure

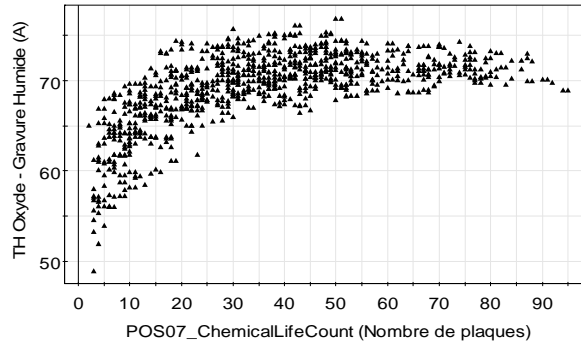


Figure 70. Influence du vieillissement du bain de H_3PO_4 sur la stabilité de la gravure humide ON STI.

Les résultats de modélisation apportent une explication quant à la cause des variations engendrées par l'étape de gravure humide : la sélectivité du H_3PO_4 par rapport à l'oxyde est plus faible lorsque le bain correspondant a été très peu utilisé. Cette première conclusion indique que l'épaisseur d'oxyde sur la tranchée doit être également impactée par le vieillissement du bain de H_3PO_4 . En effet, l'influence de la gravure du nitrure sur les zones non-actives (composées d'oxyde de silicium) n'est pas la même si le composé chimique est neuf ou usagé : pour un bain relativement neuf, moins sélectif par rapport à l'oxyde, la quantité de SiO_2 retirée est plus importante que si le bain est "vieux". La hauteur entre les zones actives et non-actives sera alors moins importante.

IV.5.b- Apport des modélisations – Optimisation du contrôle FDC de la gravure ON

La modélisation du comportement du procédé de gravure humide ON a permis de quantifier l'impact de chaque paramètre collecté de l'équipement sur les conditions de procédé. En particulier, nous avons pu montrer que 60% environ des variations d'épaisseur d'oxyde sont corrélées au vieillissement du bain de H_3PO_4 . L'importance de la nature de ce produit chimique sur les caractéristiques physiques fait émettre l'hypothèse qu'une partie de la variabilité non expliquée peut provenir de la concentration de H_3PO_4 (paramètre non collecté à l'heure actuelle par le système FDC).

L'information relative au vieillissement du bain de H_3PO_4 doit être incorporée lors de l'implémentation de la boucle de régulation Feed Forward au niveau de la gravure humide. Le modèle établi deviendra ainsi de la forme :

$$t_{\text{Gravure humide}} = f(\text{TH Nitrure} - \text{CMP}, \text{Vieillessement du bain } H_3PO_4)$$

Le domaine de variabilité du paramètre TH Oxyde - Gravure Humide étant inférieur aux limites de spécification et de contrôle, aucune optimisation du plan de contrôle FDC ne peut être effectuée.

V- Conclusion

Le chapitre III a présenté les résultats des modélisations statistiques entre l'ensemble des mesures physiques & électriques et les paramètres des équipements. La Figure 71 récapitule les corrélations établies (seules les corrélations supérieures à 5% sont représentées).

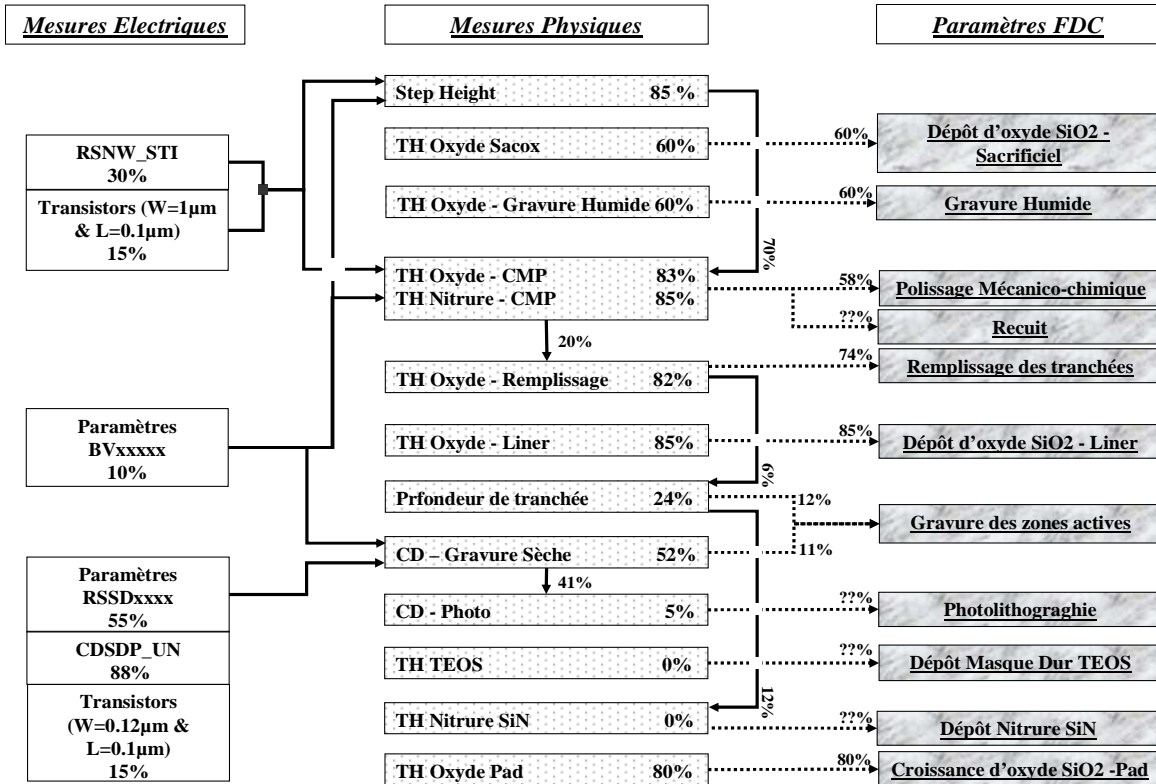


Figure 71. Récapitulatif des corrélations entre l'ensemble des mesures du module STI.

Cette modélisation a ainsi caractérisé la nature et l'origine de la variabilité de l'ensemble des mesures électriques et physique du module STI. Ceci a ensuite permis d'identifier statistiquement les opérations de fabrication à améliorer. Les simulations de l'implémentation d'une boucle de régulation de type Feed Forward au niveau de la gravure humide indiquent une amélioration de l'ordre de 40% de la variance du Step Height.

La recherche des corrélations entre les mesures physiques et les paramètres FDC ont contribué à l'amélioration du plan de contrôle des équipements de fabrication en définissant pour chaque opération les paramètres à contrôler et le cas échéant, les limites de contrôles associés.

Le domaine de variation étant particulièrement restreint (seulement quelques mesures hors spécifications), les relations observées sont purement linéaires. L'utilisation des réseaux de neurones n'est donc pas nécessaire pour ce cas d'étude.

Chapitre 3

Modélisation des comportements physiques et électriques des transistors CMOS pour la technologie 90nm

I-	Introduction	112
II-	Présentation des modélisations entre les mesures physiques et électriques du module grille	117
III-	Apport des modélisations établies pour la réduction et le contrôle de la variance des performances des transistors	122
IV-	Modélisation du comportement des étapes élémentaires du module de fabrication des transistors	129
V-	Conclusion	148

Chapitre 3 : Modélisation des comportements physiques et électriques des transistors CMOS pour la technologie 90nm

Le chapitre 3 s'intéresse à la modélisation du comportement du transistor. L'objectif de ce chapitre est, en s'appuyant sur les approches statistiques multivariées et neuronales proposées, de comprendre les sources de variations des propriétés électriques des transistors MOS. Contrairement au chapitre précédent où l'étude s'est focalisée sur l'optimisation d'une mesure physique (le Step Height), nous chercherons ici à optimiser les propriétés électriques des transistors.

Après une courte introduction présentant le contexte d'étude ainsi que les problématiques liées à la dispersion des performances électriques des transistors, nous caractériserons et validerons physiquement l'ensemble des corrélations entre les mesures physiques et électriques pour la technologie 90nm. Ces modélisations permettront de définir des voies d'améliorations afin de réduire la dispersion des mesures électriques des transistors. Dans un dernier paragraphe, nous modéliserons le comportement de chaque opération de fabrication en analysant les corrélations entre les paramètres des équipements collectés durant les procédés et les mesures physiques correspondantes.

I- Introduction

Les performances électriques des transistors conditionnent le rendement final des circuits. Pour les technologies sub90nm, le principal problème est de garantir une faible dispersion des caractéristiques électriques entre les transistors. Dans le chapitre 2, les modélisations statistiques ont mis en évidence qu'un faible pourcentage de la variabilité des caractéristiques électriques des transistors provient des variations de Step Height. Les analyses présentées dans ce chapitre visent à quantifier les autres contributeurs des variations des performances électriques des transistors pour la technologie 90nm.

Le module de fabrication des transistors –module grille– est constitué de 36 étapes de fabrication (les étapes de nettoyage ne sont pas comptées ici). La majeure partie de ces opérations est contrôlée par une opération de métrologie (Figure 72).

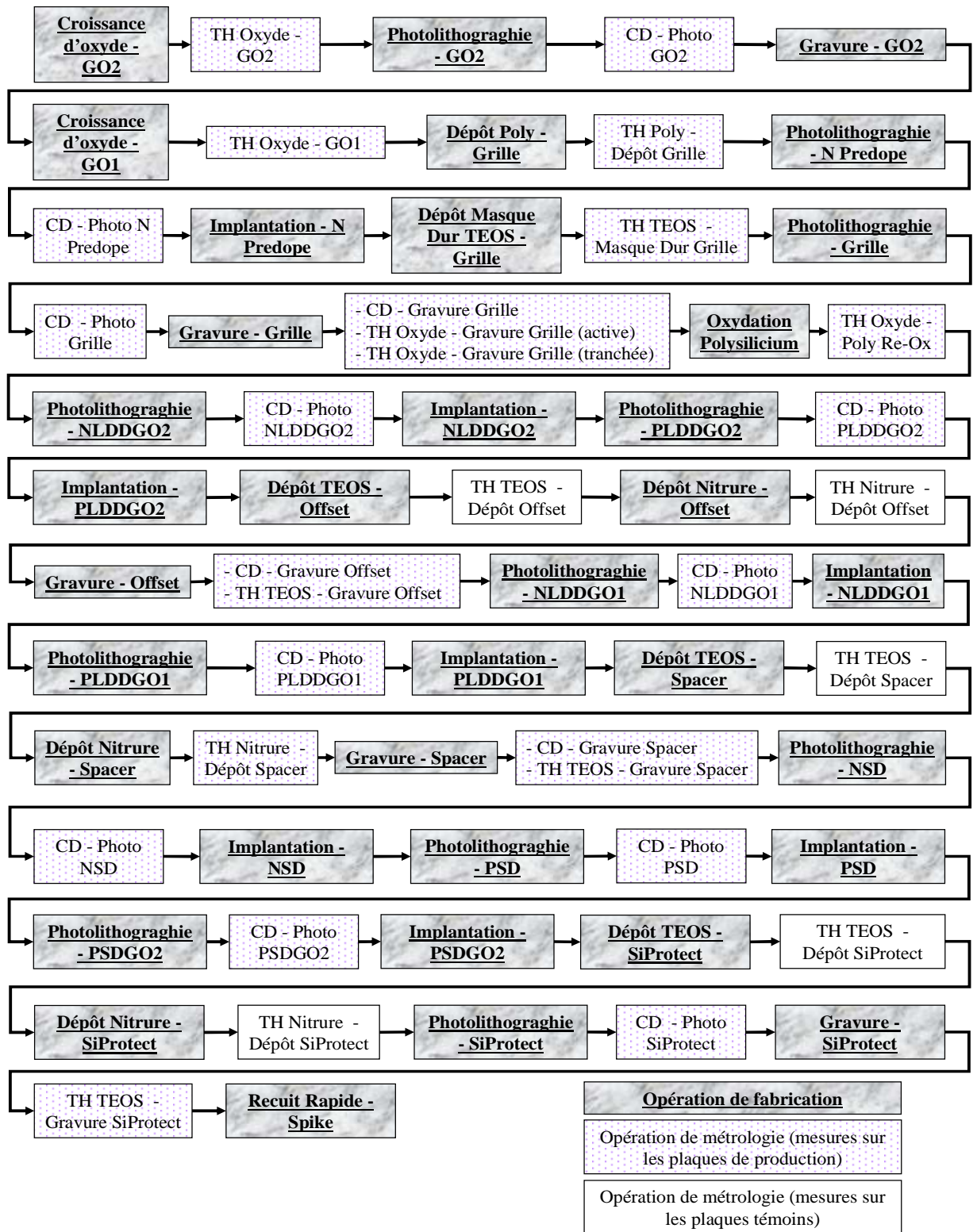


Figure 72. Enchaînement des opérations de fabrication des transistors pour la technologie 90nm.
(TH représente une épaisseur et CD une dimension critique)

Nous noterons que :

- Pour la technologie 90nm, deux types de transistors sont élaborés : Les transistors de type –GO2– à forte épaisseur de grille (~55Å), fonctionnant à des vitesses plus réduites et les transistors de type –GO1– à faible épaisseur d'oxyde de grille (~16Å),
- Deux implantations de la source et du drain sont effectuées : Une implantation à faible énergie (LDD – Lightly Doped Drain) et une implantation à plus forte énergie (SD – Source Drain).
- Les opérations de dépôts d'oxyde TEOS et de Nitrure, effectuées dans des fours LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) sont contrôlées par des mesures sur des plaques témoins. Ces témoins sont placés dans des positions prédéfinies dans le four avec les plaques de production. Aucune mesure n'est effectuée sur les plaques de production,
- Le contrôle des opérations d'implantation n'est pas réalisé sur les plaques de production.

La Figure 73 présente plus précisément la signification des principales mesures effectuées lors du module grille. Afin de ne pas alourdir la figure, les transistors GO2 de type PMOS ne sont pas représentés ici. Leur représentation se déduit de celle des transistors GO2 de type NMOS.

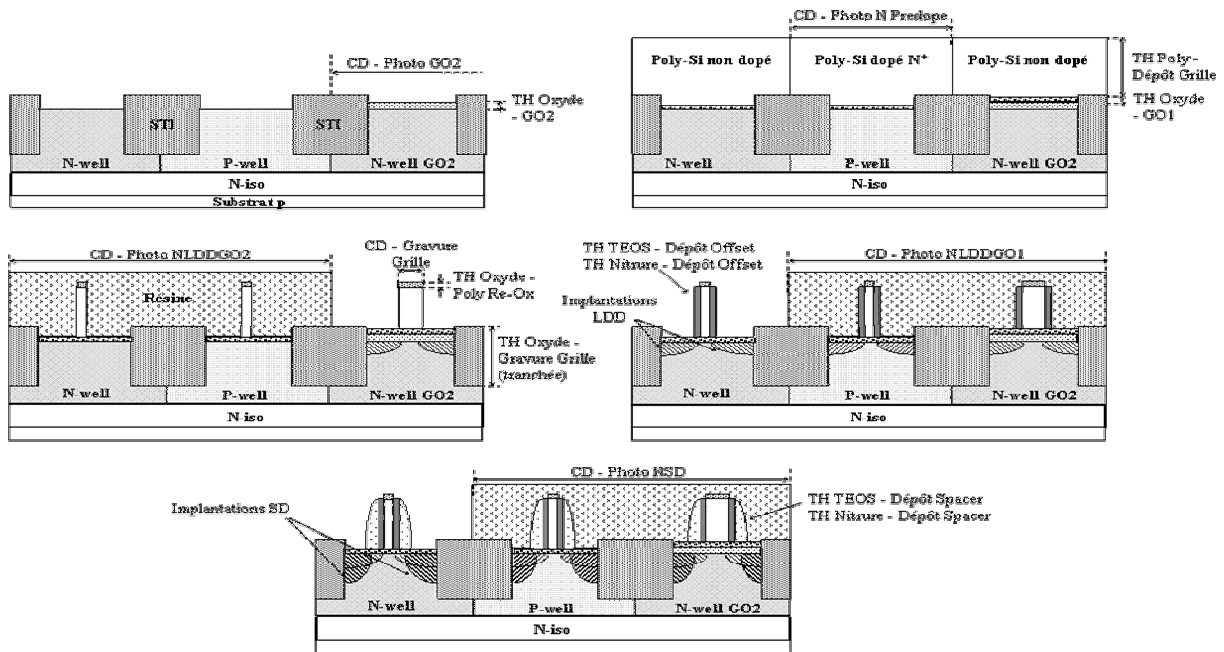


Figure 73. Représentation des couches mesurées dans le module grille (après gravure GO2 (a), après photo N Pre-dope (b), après implantation NLDDGO2 (c), après implantation NLDDGO1 (d) et après implantation NSD (les étapes de photolithographie et gravure SiProtect ne sont pas représentées ici)).

Les mesures des dimensions après les gravures grille, offset et spacer représentent la largeur de la totalité du motif à savoir :

- Le paramètre "CD - Gravure offset" représente la largeur du motif grille + offset,
- Le paramètre "CD - Gravure spacer" représente la largeur du motif grille + offset + spacer.

A la fin de l'élaboration des puces, plusieurs mesures électriques permettent de mesurer les caractéristiques électriques des transistors.

I.1- Le contrôle du transistor : le processus clé de la technologie

Les 3 grandeurs principales caractérisant les performances des transistors sont :

- Le courant de saturation Drain-Source à l'état On : I_{on} ou IDS (NIDS pour les transistors NMOS et PIDS pour les transistors PMOS),
- Le courant Drain-Source à l'état Off : I_{off} ou IDL (NIDL pour les transistors NMOS et PIDL pour les transistors PMOS),
- La tension de seuil : V_T (NVT pour les transistors NMOS et PVT pour les transistors PMOS).

La Figure 74 représente la distribution de chacun des 3 paramètres électriques en fonction des spécifications pour la technologie 90nm (données des mois de août à décembre 2005) ainsi que les Cpk correspondants.

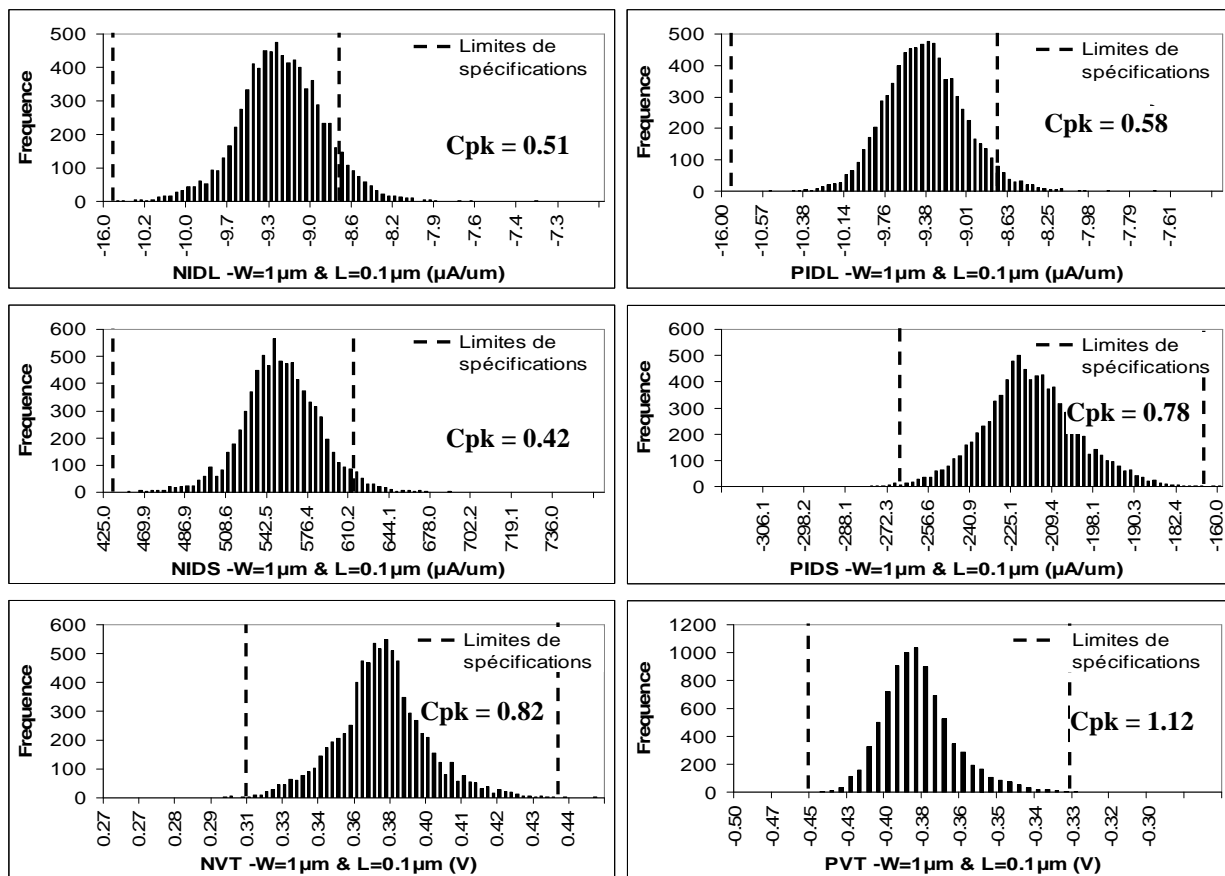


Figure 74. Distribution des mesures I_{on} , I_{off} et de V_t et spécifications associées pour des transistors NMOS et PMOS de dimensions $W=1\mu m$ & $L=0.1\mu m$ (données de novembre à décembre 2005).

Ainsi pour la technologie 90nm, les courants I_{off} et I_{on} présentent une forte dispersion (et par conséquent de faibles indices Cpk). Afin d'améliorer les performances des transistors il devient nécessaire :

- De proposer des actions précises permettant de diminuer la variabilité des courants I_{off} et I_{on} ,
- De répercuter les spécifications des mesures électriques sur chacune des mesures physiques du module grille afin de garantir un contrôle optimum des performances électriques des transistors.

1.2- Objectifs de la modélisation du comportement des transistors

La technologie 90nm étant en phase de production, de nombreuses mesures physiques sont collectées pour chaque opération de métrologie du module grille. La Figure 75 décrit la répartition des mesures pour chacune de ces opérations de contrôle normalisée par rapport aux spécifications proposées par les ingénieurs "device".

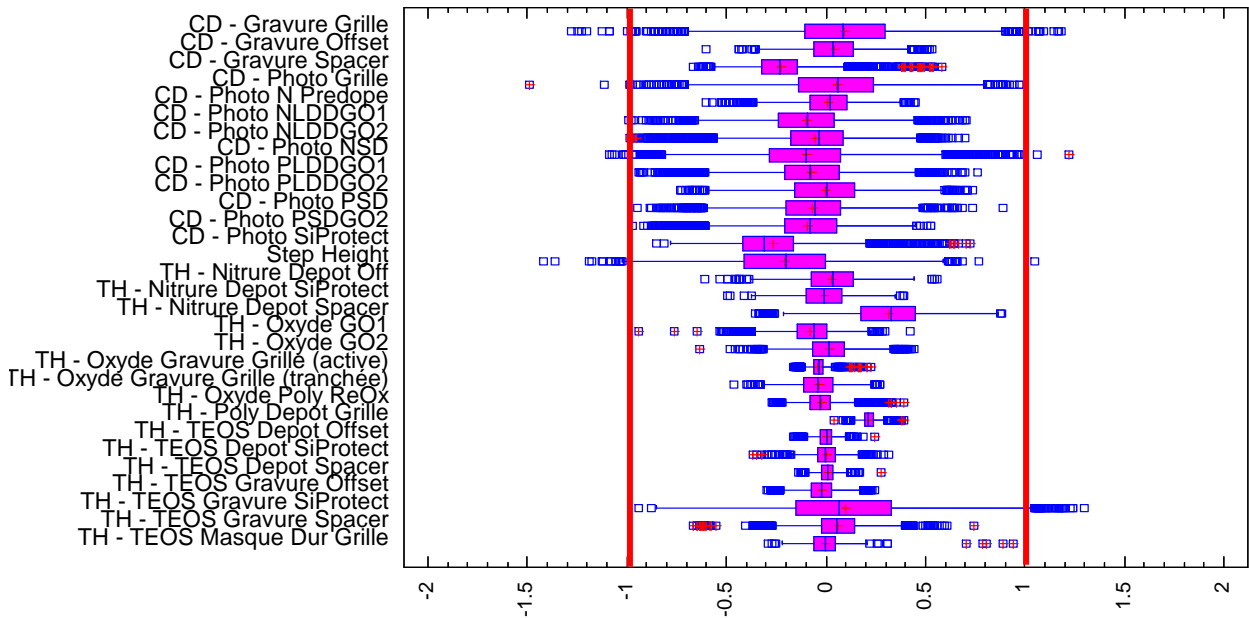


Figure 75. Distribution des mesures physiques du "module grille".

Les valeurs sont normalisées par rapport aux spécifications définies par les ingénieurs "device" (en rouge ici).

La figure ci-dessus montre une grande variabilité des mesures par rapport aux spécifications pour les opérations de photolithographie et de gravure. Néanmoins, la variabilité des procédés de dépôt est plus faible. Comme pour les analyses de modélisation réalisées dans le chapitre 2, la variabilité importante pour la majorité des mesures permet d'envisager une analyse statistique des corrélations entre les mesures physiques sans réaliser d'expériences supplémentaires dans un premier temps. La recherche de ces corrélations sera effectuée en utilisant l'approche multivariée. Cette modélisation se déroulera selon trois axes :

- Présentation des corrélations entre les mesures physiques et électriques du module grille. Cette analyse permettra de connaître statistiquement les corrélations entre chacune des étapes de fabrication et leur impact sur les performances électriques des transistors,
- Ces modélisations permettront de caractériser statistiquement la source et la nature de la variance des performances électriques des transistors. Les actions proposées pour diminuer la variabilité des performances électriques des transistors seront présentées et la cohérence des spécifications appliquées aux mesures physiques sera discutée,
- Modélisation des variations des mesures physiques en fonction des paramètres des équipements.

II- Présentation des modélisations entre les mesures physiques et électriques du module grille

Dans ce paragraphe, nous présentons tout d'abord les corrélations statistiques entre les opérations de fabrication à travers l'analyse des différentes mesures physiques effectuées pendant le "module grille". Ensuite, nous exposons l'impact de la variabilité de ces opérations sur les performances électriques des transistors. Dans ce paragraphe, seuls les résultats des modélisations statistiques et validées physiquement sont présentés. Par souci de clarté pour le lecteur, l'ensemble de la validation physique des relations statistiques est exposé en Annexe 6.

II.1- Modélisation statistique des interactions entre les opérations de fabrication du module grille

Le Tableau 18 ci-dessous présente les relations entre les mesures physiques du module grille (par souci de clarté seuls les paramètres corrélés sont représentés). Nous noterons que ces relations ne sont valables que dans la gamme de variabilité étudiée définie par la Figure 75.

La modélisation des interactions entre les mesures physiques du module grille démontre principalement que :

- 50% des mesures physiques effectuées ne dépendent que de l'opération de fabrication correspondante,
- Les principales sources de variations des dimensions des motifs après photolithographie dépendent majoritairement du Step Height,
- Les différents dépôts influencent les performances des procédés de gravure,

Remarque : les opérations de dépôt TEOS et nitrure de type LPCVD sont contrôlées par des mesures sur plaques témoins. Par conséquent, les données ne permettent pas de déterminer l'influence des différentes opérations de fabrication sur les dépôts d'oxyde TEOS et de Nitrure,

Chapitre 3 : Modélisation des comportements des transistors CMOS

Entrée \ Sortie	Indicateurs de corrélation		Step Height	TH Oxyde - GO1	CD - Photo Grille	CD - Gravure Grille	TH Oxyde - Gravure Grille (tranchée)	TH TEOS - Dépôt Offset	CD - Gravure Offset	TH TEOS - Gravure Offset	TH Nitrure - Dépôt Spacer	TH TEOS - Gravure Spacer
	R ²	Q ²										
CD - Photo N Predope	9 %	9 %	9 % (+)	-								
CD - Photo Grille	8 %	7 %	8 % (+)	-								
CD - Gravure Grille	27 %	26 %	3 % (+)	-	24 % (+)							
TH Oxyde - Gravure Grille (tranchée)	91 %	91 %	81 % (-)	10 % (-)	-	-	-					
CD - Photo NLDDGO2	35 %	34 %	35 % (+)	-	-	-	-					
CD - Photo PLDDGO2	37 %	23 %	37 % (+)	-	-	-	-					
CD - Gravure Offset	60 %	60 %	-	-	-	60 % (+)	-	-	-	-		
TH TEOS - Gravure Offset	28 %	25 %	-	-	-	-	13 % (-)	15 % (+)	-	-		
CD - Photo NLDDGO1	23 %	19 %	23 % (+)	-	-	-	-	-	-	-		
CD - Photo PLDDGO1	27 %	21 %	27 % (+)	-	-	-	-	-	-	-		
TH Nitrure - Dépôt Spacer	8 %	5 %	-	-	-	-	-	-	-	8% (-)		
CD - Gravure Spacer	50 %	50 %	-	-	-	20 % (+)	-	-	5 % (+)	-	25% (+)	
TH TEOS - Gravure Spacer	30 %	25 %	-	-	-	-	16 % (-)	-	-	14% (+)	-	
CD - Photo NSD	29 %	28 %	29 % (+)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CD - Photo PSD	36 %	33 %	36 % (+)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CD - Photo PSDGO2	35 %	32 %	35 % (+)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TH TEOS - Gravure SiProtect	29 %	27 %	-	-	-	-	5 % (-)	-	-	4% (+)	-	20% (+)
										Mesure effectuée à posteriori		

Tableau 18. Quantification des corrélations entre les mesures physiques du module grille.

II.2- Modélisation multivariée de l'impact des variations des mesures physiques sur les caractéristiques électriques des transistors

La seconde partie de cette partie vise à mieux comprendre l'origine de la variabilité des performances électriques des transistors. L'ensemble des mesures électriques potentiellement influençable par des variations des procédés du module grille seront prises en compte. Les mesures étudiées se regroupent en plusieurs classes :

- Résistances carrées de structures,
- Dimensions électriques des structures déduites des mesures des résistances carrées,
- Courants de fuite de diodes N+/PWell et P+/NWell situées entre 2 tranchées d'isolation ou entre deux lignes de polysilicium.
- Courants à l'état On et à l'état Off ainsi que les tensions de seuil de deux familles de transistors :
 - o W=1 μ m et L=0.1 μ m,
 - o W=0.12 μ m et L=0.1 μ m.

Les modélisations statistiques et validées physiquement (Tableau 19) démontrent que :

- Les caractéristiques électriques des transistors de type NMOS et PMOS (courant I_{on} , I_{off} et tension de seuil V_T) dépendent en grande partie de la largeur physique de la grille. Cette relation, bien décrite dans la littérature [WOLF 2000] permet néanmoins de quantifier le pourcentage de la variabilité de ces mesures électriques due à la largeur de grille,
- Les transistors de type PMOS sont également sensibles à la dimension des motifs après gravure spacer. L'hypothèse la plus vraisemblable est que les espèces utilisées pour le dopage SD à forte énergie des transistors PMOS (Bore) diffusent plus facilement dans le silicium que les espèces utilisées pour le dopage des transistors NMOS (Phosphore et Arsenic) [MATHIOT 2000],
- Les résistances des zones actives sont principalement impactées par les variations d'épaisseur de TEOS avant les implantations source et drain à faible énergie. L'implantation des zones actives étant effectuée à travers cette couche d'oxyde, plus celle-ci est importante, plus la quantité d'espèces dopantes introduites dans les zones actives est faible (et la profondeur de jonction se trouve plus proche de la surface): Ceci se traduit donc par une augmentation de la résistance mesurée. Pour les zones implantées P, l'opération de photolithographie avant implantation influe également sur ces résistances car elle joue sur la largeur de la zone implantée,
- La variabilité des courants de fuite des diodes N+/PWell et P+/NWell (paramètres de type IxFING & IxPOLY) provient essentiellement de la largeur physique de la grille et du

procédé de gravure spacer. La largeur physique de la grille délimitant la diode (voir Annexe 6) influe sur la largeur de la zone dopée et par conséquent sur son courant de fuite. L'épaisseur de TEOS après gravure spacer joue, comme nous l'avons vu ci-dessus, sur l'implantation des espèces dopantes et plus particulièrement sur la profondeur de jonction. Une profondeur de jonction faible implique par conséquent des courants de fuite important.

L'Annexe 6 explicite plus en détail l'ensemble de ces corrélations.

Chapitre 3 : Modélisation des comportements des transistors CMOS

Entrée \ Sortie		Indicateurs de corrélation		TH Oxyde - GO2	TH Oxyde - GO1	CD - Gravure Grille	TH Oxyde - Gravure Grille (active)	TH TEOS - Gravure Offset	CD - Gravure Spacer	TH TEOS - Gravure Spacer	CD - Photo NSD	CD - Photo PSD	TH TEOS - Gravure SiProtect	
		R ²	Q ²											
Courants de fuite	INFING	33 %	32 %	-	-	10 %	-	-	-	23 %	-	-	-	
	INFING_UN	35 %	35 %	-	-	10 %	-	-	-	25 %	-	-	-	
	INPOLY	21 %	20 %	-	-	8 %	-	-	-	13 %	-	-	-	
	INPOLY_UN	35 %	34 %	-	-	15 %	-	-	10 %	10 %	-	-	-	
	IPFING	9 %	8 %	-	-	9 %	-	-	-	-	-	-	-	
	IPFING_UN	10 %	10 %	-	-	10 %	-	-	-	-	-	-	-	
	IPPOLY	41 %	41 %	-	-	-	-	-	16 %	12 %	-	-	13 %	
	IPPOLY_UN	41 %	40 %	-	-	-	-	-	21 %	9 %	-	-	11 %	
Dimensions électriques	CDPP_UN	57 %	56 %	-	-	57 %	-	-	-	-	-	-	-	
	TP1NPW	47 %	46 %	-	47 %	-	-	-	-	-	-	-	-	
	TP1PNW	56 %	55 %	-	56 %	-	-	-	-	-	-	-	-	
Résistances	RSPN3	18 %	17 %	-	-	-	-	-	-	18 %	-	-	-	
	RSPN3_UN	10 %	9 %	-	-	-	-	-	-	10 %	-	-	-	
	RSSDN3	19 %	18 %	-	-	-	-	-	-	19 %	-	-	-	
	RSSDN3_UN	65 %	64 %	-	-	-	-	-	-	57 %	7 %	-	1 %	
	RSSDN11_UN	14 %	13 %	-	-	-	-	-	-	7 %	2 %	-	5 %	
	RSSDN1114	14 %	11 %	-	-	-	-	-	4 %	5 %	-	-	5 %	
	RSPP3	28 %	27 %	-	-	-	10 %	-	-	-	-	18 %	-	
	RSPP3_UN	40 %	39 %	-	-	-	-	-	-	18 %	-	8 %	14 %	
	RSSDP3	12 %	12 %	-	-	-	-	-	-	6 %	-	3 %	3 %	
	RSSDP3_UN	32 %	31 %	-	-	6 %	-	-	-	12 %	-	7 %	7 %	
RSSDP11	9 %	8 %	-	-	-	-	-	-	3 %	-	3 %	3 %		
RSSDP11_UN	29 %	29 %	-	-	-	-	-	-	13 %	-	6 %	10 %		
W = 1µm & L = 0.1µm	Ion, Ioff, VT	NIDL	32 %	31 %	-	-	32 %	-	-	-	-	-	-	
		NIDS	29 %	27 %	-	-	29 %	-	-	-	-	-	-	
		NVT	10 %	10 %	-	-	8 %	-	-	-	2 %	-	-	
		PIDS	31 %	30 %	-	-	13 %	-	-	18 %	-	-	-	
		PVT	12 %	11 %	-	-	2 %	-	-	10 %	-	-	-	
		PIDL	28 %	27 %	-	-	10 %	-	-	16 %	2 %	-	-	-
W = 0.12µm & L = 0.1µm	Ion, Ioff, VT	NIDL	6 %	5 %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6 %
		NIDS	18 %	17 %	-	-	9 %	5 %	-	-	-	3 %	-	-
		NVT	12 %	9 %	3 %	-	5 %	4 %	-	-	-	-	-	-
		PIDS	26 %	26 %	5 %	-	5 %	3 %	-	13 %	-	-	-	-
		PVT	10 %	9 %	5 %	-	-	5 %	-	-	-	-	-	-
		PIDL	3 %	3 %	3 %	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 19. Modélisation de l'influence des variations des mesures physiques du module grille sur les principales mesures électriques effectuées. (seules les mesures physiques ayant une influence sont répertoriées ici).

Les modélisations multivariées menées dans ce paragraphe ont notamment permis de caractériser la source de la variance des mesures électriques et physiques du module grille. Dans la partie suivante, nous utilisons la méthodologie développée dans le chapitre 1 - paragraphe 4 afin de réduire et de mieux contrôler cette variance.

III- Apport des modélisations établies pour la réduction et le contrôle de la variance des performances des transistors

III.1- Apport de la modélisation des interactions entre les opérations de fabrication

Les analyses de corrélations entre les différentes mesures physiques effectuées lors du module grille ont permis de mieux appréhender les interactions entre les opérations de fabrication. Cependant, l'influence des dépôts TEOS et Nitrure ne peut être totalement quantifiée qu'au niveau des lots de production, les mesures physiques étant réalisées sur des plaques témoins. La compréhension de ces corrélations va nous permettre, dans la seconde partie de ce paragraphe, de proposer des actions de réduction de la variabilité des performances électriques.

III.2- Réduction de la variabilité des caractéristiques électriques des transistors – Diminution de la dispersion des courants de saturations

Les corrélations établies entre les principaux paramètres électriques et physiques du transistor indiquent qu'une grande partie de la variabilité des courants de saturation peut être expliquée à l'aide des mesures physiques du module grille :

- Les variations des dimensions des espaceurs contribuent à la variabilité des caractéristiques électriques des transistors PMOS. Les analyses des mesures physiques du transistor montrent qu'une partie de ces variations provient du dépôt nitrure espaceur.
- La variabilité des dimensions de la grille du transistor impacte les courants Off et On ainsi que la tension de seuil des transistors NMOS et PMOS.

La Figure 76 présente la décomposition de variance des trois mesures physiques précédemment citées ainsi que celle du paramètre CD - Photo Grille. Cette analyse montre une contribution importante des effets lot à lot et plaque à plaque.

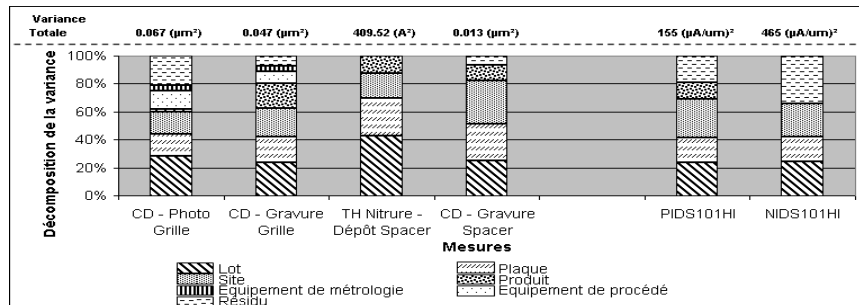


Figure 76. Décomposition de variance des mesures physiques corrélés aux variations des courants Off & On des transistors.

III.2.a- Réduction de la variabilité induite par le dimensionnel de la grille

La principale source de variabilité des dimensions de la grille est l'effet lot à lot. D'après la Figure 76 et les analyses de corrélation entre les mesures physiques, une importante partie de cette variabilité provient de la photolithographie précédente. Une solution de réduction de cette variabilité consiste à mettre en œuvre un système de régulation de type Feed Forward. L'objectif de ce système d'asservissement est d'ajuster les paramètres de la recette de gravure en fonction des résultats obtenus après photolithographie. Sur le site de Crolles2, de par la nature de l'empilement de la grille à graver (présence d'un masque dur en TEOS), l'ajustement de la recette de gravure est réalisé en modifiant le temps de gravure de la résine. La mise en place de ce système d'asservissement fait partie intégrante des travaux menés par Séverine Marquet, doctorante sur le site de Crolles 2 (2005-2008). Les premiers résultats obtenus suite à l'implémentation de cette boucle de régulation sont présentés ci dessous.

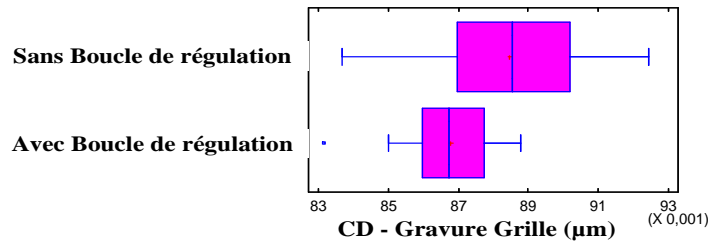


Figure 77. Dispersion de la largeur de grille avant et après implémentation de la boucle de régulation Feedforward grille.

III.2.b- Réduction de la variabilité induite par les espaceurs

Amélioration du dépôt nitrure espaceur

Lors des analyses précédentes, nous avons admis qu'environ 25% des variations des dimensions des espaceurs proviennent de l'opération de dépôt nitrure spacer ("TH Nitrure - Dépôt Spacer"). Cette variabilité étant principalement due à des effets lot à lot et plaque à plaque. L'ensemble des plaques d'un même lot est traité en même temps dans le four. La Figure 78 représente schématiquement la vue en coupe d'un four TEL Formula et l'évolution de l'épaisseur moyenne déposée en fonction de la position des plaques dans ce four.

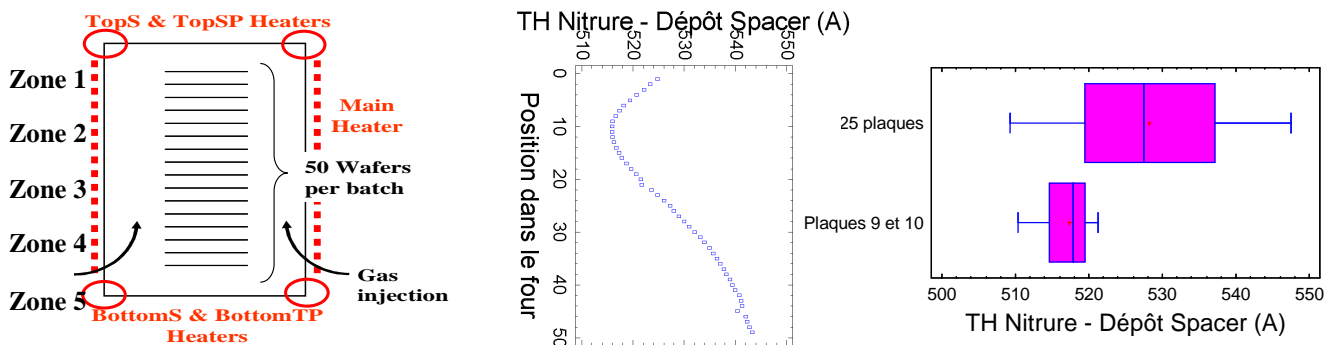


Figure 78. Représentation d'un four TEL Formula & évolution de l'épaisseur moyenne de Nitrure déposée en fonction de la position des plaques.

La dispersion plaque à plaque provient de la non uniformité du dépôt selon la position des plaques dans le four. Nous rappelons également qu'en production, les plaques mesurées étant seulement les plaques 9 & 10 d'un lot, il est légitime de penser que cet effet est bien plus important que celui quantifié - Figure 78 (les plaques 9 & 10 occupent des places très proches dans le four et leur position ne varie pas d'un lot à l'autre).

L'optimisation du procédé de dépôt vise à améliorer les dispersions inter- et intra- plaque en modifiant les températures des 5 zones de chauffe (TOPS, TOPSP, MAIN, BOTTOMS et BOTTOMTP). Cependant, la dispersion des 5 zones du four mesurée sur les plaques de production n'étant pas suffisante pour construire ce modèle, la mise en place d'un plan d'expérience est nécessaire.

Interprétation du plan d'expérience

Le besoin d'une modélisation au niveau des sites de mesures

La Figure 79 présente le phénomène d'inversion de profil constaté sur les plaques placées dans la zone 1 du four lorsque l'on fait varier les températures de chauffage TOPS et TOPSP. Le profil concave à "basse" température (Températures au niveau du TOPS et TOPSP ~700°C) devient convexe à plus haute température (Températures au niveau du TOPS et TOPSP ~705°C). La Figure 79-c décrit l'évolution de la valeur moyenne des mesures au centre et au bord de la plaque. Elle montre que l'inversion de profil provient de l'épaisseur de nitrure déposée qui est plus sensible à la température en bord de plaque. Le bord de la plaque étant plus proche des zones de chauffage, il est plus sensible que le centre.

Les statistiques "moyennes" et "écart type" de ces deux types de profils sont équivalentes. Ce phénomène implique donc que, pour modéliser complètement l'évolution de ces fours, il est nécessaire d'effectuer une modélisation au niveau des sites mesurés physiquement.

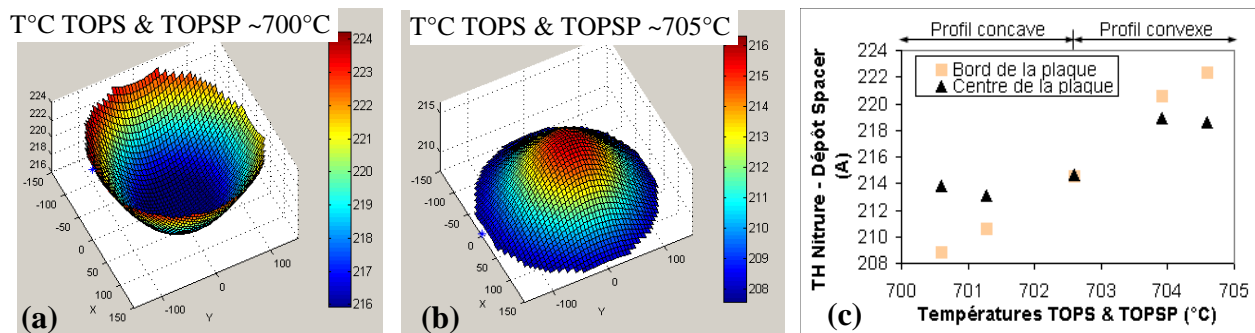
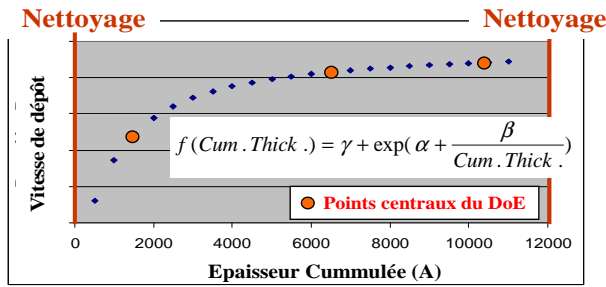


Figure 79. Inversion de profil dans le four TEL en fonction des conditions expérimentales.

La nécessité de pré-traiter les données

Les résultats des trois points centraux du plan d'expérience soulignent l'instabilité des fours TEL Formula au cours du temps. En effet, entre 2 nettoyages consécutifs, la vitesse de dépôt évolue de façon logarithmique avec le temps et plus précisément avec l'épaisseur cumulée au niveau du four depuis le dernier nettoyage (Figure 80).



Avec :

- α, β, γ : coefficients de la fonction,
- Cum.Thick. : Epaisseur de nitrure accumulée dans le four depuis le dernier nettoyage.

Figure 80. Vitesse de dépôt du nitrure en fonction de l'épaisseur cumulée dans le four.

Cette évolution de la vitesse de dépôt explique l'effet lot à lot caractérisé par l'analyse de variance précédente (Figure 76). L'interprétation du plan d'expérience nécessite donc de corriger chacune des mesures afin que la modélisation ne tienne pas compte de l'évolution de la vie du four. L'épaisseur corrigée est définie, suite à ces expériences, par la fonction :

$$TH_{Corr} = TH_{Mes} + \left(\gamma + \exp\left(\alpha + \frac{\beta}{(Ep.Cum.)_0} \right) \right) - \left(\gamma + \exp\left(\alpha + \frac{\beta}{(Ep.Cum.)} \right) \right)$$

Avec $(Ep.Cum.)_0$: Valeur de l'épaisseur cumulée pour le premier point du DoE,

$(Ep.Cum.)$: Valeur de l'épaisseur cumulée au point N du DoE.

Résultats expérimentaux

La Figure 81 présente les résultats des modélisations de chacune des 5 zones du four. Le modèle d'influence des zones de température sur l'épaisseur déposée est effectué en utilisant des plaques témoins. Pour ces travaux, ce modèle n'a pas été appliqué sur les plaques de production car leur position dans le four, contrairement aux plaques témoins est inconnue. Ces modèles montrent l'influence prépondérante :

- De la température TOP S sur les 2 zones du haut du four,
- De la température BOTTOM S sur les 2 zones du bas,
- Des interactions sur la zone du milieu. Pour cette zone, le modèle est moins explicatif car la zone de température principal est gardée constante.

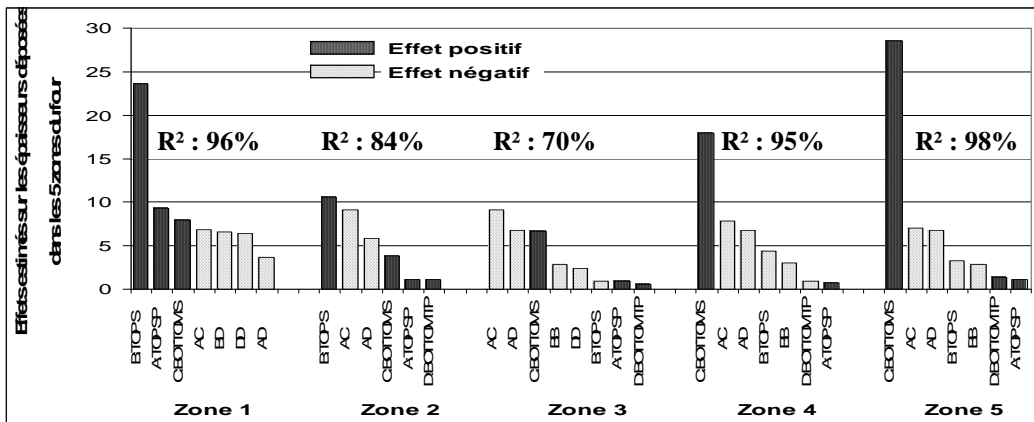


Figure 81. Modélisation de l'épaisseur de nitrure déposée dans les 5 zones de température du four en fonction des consignes de température appliquées.

Les modèles mathématiques de comportement des 5 zones du four permettent de prédire très correctement l'épaisseur déposée au niveau de chacune de ces zones en fonction des conditions expérimentales de température et de l'épaisseur cumulée dans le four depuis le dernier nettoyage. Le fonctionnement de la boucle de régulation proposée s'appuie sur ces prédictions.

Principe de fonctionnement de la boucle de régulation proposée

Après chaque passage des 5 plaques témoins dans le four, une optimisation de type stochastique [THIRIEZ 2004] est effectuée basée sur le modèle précédent et les mesures réalisées. Cette optimisation vise à minimiser au maximum la dispersion entre les 5 plaques en appliquant toutefois des contraintes sur l'uniformité intra plaque. Pour chaque optimisation, toutes les valeurs mesurées sont corrigées de l'épaisseur accumulée dans le four. Un ajustement du temps de dépôt est également proposé afin de recentrer le procédé sur la valeur cible. La Figure 82 présente les résultats d'une optimisation. L'exemple traité montre que sans fortement dégrader la dispersion intra plaque, un ajustement des zones de température permet d'envisager une amélioration de l'ordre de 50% de la dispersion maximale entre les 5 plaques du four.

Paramètres du Procédé "n"		
Température des Zones (°C)	A:TOPSP	697.8
	B:TOPS	702.9
	C:BOTTOMS	695.7
	D:BOTTOMTP	697.2
Temps du procédé (s)		6510
Épaisseur accumulée dans le four depuis le dernier nettoyage (A)		6000
Valeurs mesurées (A)	Moyenne Zone 1	540.78
	Moyenne Zone 2	531.41
	Moyenne Zone 3	537.74
	Moyenne Zone 4	545.47
	Moyenne Zone 5	544.47
	Dispersion Zone 1	4.70
	Dispersion Zone 2	3.62
	Dispersion Zone 3	3.06
	Dispersion Zone 4	3.14
	Dispersion Zone 5	2.89
	Dispersion maximale entre les 5 plaques	14.06
Paramètres du procédé "n+1"		
Température des Zones (°C)	A:TOPSP	697.5
	B:TOPS	703.0
	C:BOTTOMS	694.9
	D:BOTTOMTP	697.3
Temps de procédé proposé (s)		6611
Valeurs prédites (A)	Moyenne Zone 1	547.20
	Moyenne Zone 2	540.41
	Moyenne Zone 3	544.87
	Moyenne Zone 4	548.30
	Moyenne Zone 5	543.02
	Dispersion Zone 1	5.60
	Dispersion Zone 2	3.56
	Dispersion Zone 3	3.04
	Dispersion Zone 4	3.22
	Dispersion Zone 5	2.95
	Dispersion maximale entre les 5 plaques	7.88

Figure 82. Fonctionnement de la boucle de régulation des fours nitrure.

La réduction de la variabilité au niveau du dépôt nitrure spacer permet d'envisager indirectement une amélioration des résultats après gravure spacer. Cependant, d'après les analyses multivariées effectuées, il est aussi nécessaire de réduire la variabilité site à site au niveau de la gravure.

Amélioration de l'uniformité de la gravure espaceur

Dans la majorité des cas, la voie d'amélioration de la variabilité site à site nécessite une optimisation du procédé. Dans le cas de la gravure, cette optimisation nécessite la création d'un plan d'expérience afin de modéliser la dispersion intra-plaque en fonction des principales conditions expérimentales (Pression, Puissance RF, Temps de gravure principale et de sur-

gravure). La Figure 83 présente les résultats des modélisations. Dans la gamme de variation impliquée par le plan d'expérience, les principaux paramètres contributeurs des variations de dimensions des motifs sont :

- La pression : lorsque la pression augmente, le nombre d'espèces chimique dans le réacteur augmente également. Il y a donc moins d'ions créés et par conséquent le bombardement est moins important. Le ratio gravure physique / gravure chimique diminue ce qui a pour effet d'augmenter la gravure latérale et donc de diminuer les dimensions des motifs gravés.
- Les temps de gravure.

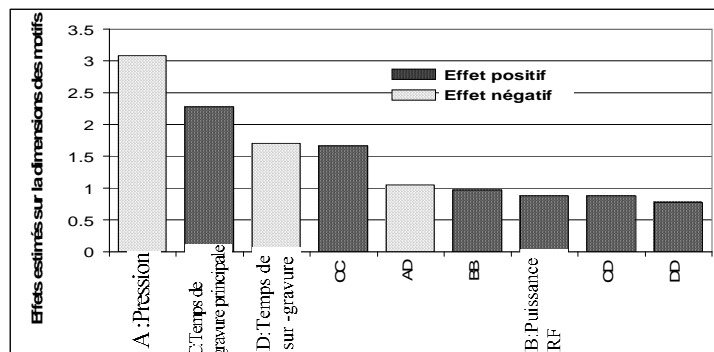


Figure 83. Modélisation des variations des motifs en fonction des paramètres de la gravure.

Basé sur ces modèles, l'optimisation prédit une amélioration de l'ordre de 30% de la dispersion intra-plaque.

III.3- Optimisation du contrôle des performances électriques des transistors

III.3.a- Modèle de prédiction des performances électriques des transistors

Les analyses statistiques multivariées ont permis d'identifier les principaux contributeurs de la variance des courants de saturations I_{on} des transistors MOS de types n et p. Des actions visant à réduire la dispersion de ces paramètres électriques ont ainsi été proposées.

La stabilité des modèles obtenus (Tableau 19) permet également d'envisager de les utiliser afin de prédire les performances électriques des transistors. La Figure 84 présente les résultats du test des modèles de variabilité des courant de saturation à l'état On et Off.

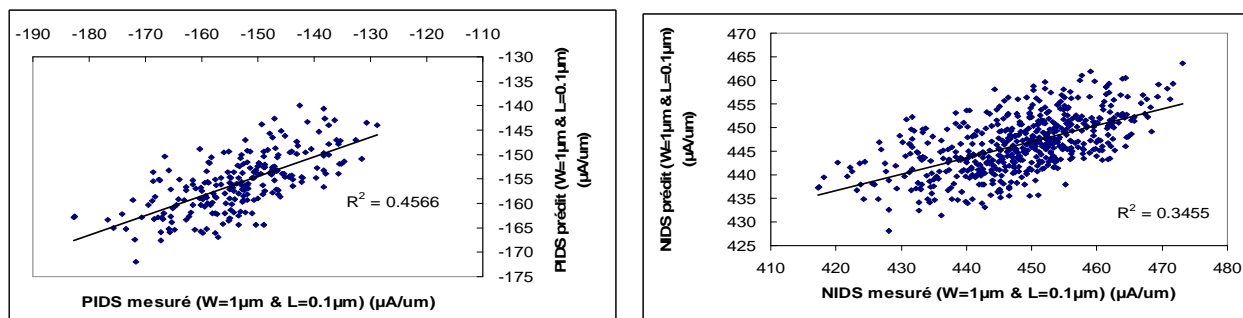


Figure 84. Mesure des courants Ion NMOS et PMOS versus valeurs prédites par les modèles statistiques.

La figure ci-dessus démontre que les modèles établis à l'aide des données de production ont une bonne qualité de prédiction dans la mesure où les valeurs des courants Ion PMOS et NMOS sont estimées avec des R² respectivement égaux à 46% et 35%. Concernant le pourcentage non expliqué de la variabilité des courants de saturation, l'hypothèse la plus vraisemblable est qu'elle provient essentiellement des étapes d'implantation de la source et du drain.

Les performances électriques pouvant être prédites avant les tests électriques, des solutions de régulation peuvent alors être envisagées : les conditions d'implantation source-drain ou de recuit rapide – spike peuvent être modifiées pour ajuster les performances électriques des transistors en fonction des valeurs électriques prédites définies par les mesures physiques précédentes (Figure 85).

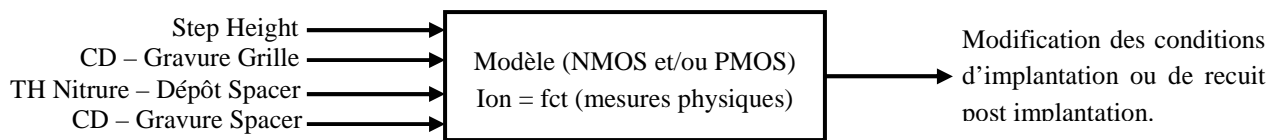


Figure 85. Utilisation du modèle de prédiction des performances électriques des transistors.

Ce travail sera développé dans le cadre de la thèse de Séverine Marquet, doctorante sur le site de Crolles 2 (2005-2008).

III.3.b- Optimisation du plan de contrôle des mesures physiques du module grille

La modélisation des performances électriques permet dans un second temps d'ajuster les limites de spécification des mesures physiques du module grille en fonction des limites des mesures électriques (Tableau 20).

		TH Oxyde - GO1 (Å)	CD - Photo Grille (µm)	CD - Gravure Grille (µm)	TH Nitrure Dépôt Spacer (Å)	CD - Gravure Spacer (µm)	TH TEOS - Gravure Spacer (Å)
Anciennes limites	Spécification Basse	22.25	0.104	0.00765	460	0.177	50
	Target	23.5	0.112	0.087	550	0.207	80
	Spécification Haute	24.75	0.120	0.0975	640	0.237	110
Limites déduites des corrélations	Spécification Basse	23.1	0.104	0.079	520	0.189	55
	Target	23.8	0.111	0.0865	555	0.200	80
	Spécification Haute	24.5	0.119	0.094	580	0.210	105

Tableau 20. Ajustement des limites de spécifications des mesures physiques du module grille.

L'optimisation du plan de contrôle SPC requiert par conséquent un resserrement des limites de spécifications au niveau des mesures CD - Gravure Spacer et TH Oxyde - GO1. Cette mise à jour du plan de contrôle devra permettre de détecter en amont des problèmes de courant Ion & Ioff ainsi que de tension de seuil. Cette détection permettra d'envisager, si possible, un ajustement de la température du recuit spike pour obtenir les caractéristiques voulues.

Dans les paragraphes précédents l'apport des analyses de corrélation entre les mesures physiques et électriques a été mis en évidence afin d'identifier les sources de variations des performances des transistors ainsi que leur nature (intra-lot, intra-plaque, ...). Cette étude a abouti à la création d'un modèle de variation permettant de prédire la valeur des mesures électriques de type I_{on} en fonction des mesures physiques effectuées au sein de la ligne de production. Cette

modélisation a ainsi permis de proposer des actions afin d'optimiser les procédés responsables de la variance des caractéristiques électriques des transistors et optimiser leur contrôle SPC. Dans le paragraphe suivant, les modélisations présentées visent à comprendre l'origine de la variabilité des procédés en corrélant les mesures physiques et les paramètres des équipements. Cette modélisation devra permettre d'en déduire les paramètres pertinents à surveiller par le système FDC ainsi que les limites à appliquer.

IV- Modélisation du comportement des étapes élémentaires du module grille

Comme pour l'analyse de modélisation de la variabilité du module d'isolation, l'ensemble des paramètres des équipements du module grille a été collecté par le système FDC. Les paragraphes qui suivent s'intéressent à la compréhension des variations constatées au niveau des mesures physiques à l'aide des paramètres FDC collectés. Pour le module d'élaboration des transistors, on distingue 4 types de procédé différents :

- Les oxydations rapides GO1, GO2 et réoxydation du polysilicium,
- La gravure de la grille du transistor, de l'offset et des espaceurs,
- Les procédés de dépôt du polysilicium, du TEOS ainsi que du nitrure à haute température,
- Les opérations de photolithographie avant gravure et avant les implantations source-drain.

Pour chacun de ces types de procédé, l'impact des variations des paramètres des équipements sur les mesures physiques associées sera quantifié.

Remarque : les équipements de photolithographie n'étant pas connectés au système FDC lors de ces analyses, aucune analyse de corrélation considérant ce type d'opération n'est présentée dans ce chapitre.

IV.1- Modélisation du comportement des procédés d'oxydation thermique - Rapid Thermal Oxidation

Le fonctionnement des procédés d'oxydation rapide a été largement présenté lors du chapitre précédent. Dans ce paragraphe, nous ne reviendrons donc pas sur le fonctionnement de ces équipements. Dans le module grille, on distingue 3 étapes d'oxydation :

- L'oxydation GO2 : cette opération forme une épaisse couche d'oxyde de grille ($\sim 55\text{\AA}$).
- L'oxydation GO1 : cette oxydation de l'ordre de 16\AA définit l'oxyde de grille des dispositifs. Cette étape est suivie d'une nitruration de l'oxyde effectuée dans le même équipement afin de limiter les courants de fuite.

- L'oxydation du polysilicium : l'opération d'oxydation du polysilicium après gravure grille permet de créer une fine couche d'oxyde protectrice pour les implantations ultérieures.

Dans ce paragraphe, nous nous intéresserons à 2 phénomènes précis : l'analyse des variations de la croissance de l'oxyde en fonction des paramètres équipements et la modélisation de la concentration en nitrure de l'oxyde nitruré.

IV.1.a- Mécanismes de croissance de l'oxyde

La gamme de variation de chacun des paramètres FDC collectés lors de l'étape principale des 3 procédés d'oxydation rapides précédemment décrits est présenté en Annexe 7. Les paramètres d'entrées présentent une variabilité importante surtout concernant la puissance des zones de chauffe mais sans effet réel sur l'épaisseur d'oxyde de grille.

Les analyses de corrélation entre les données FDC et les résultats physiques sur plaques ne montrent aucune corrélation satisfaisante d'un point de vue physique. Les analyses multivariées mènent à des relations statistiques difficilement exploitables physiquement. Ce constat provient de la grande stabilité de ces procédés engendrant seulement des variations de l'ordre du dixième d'angström.

IV.1.b- Modélisation de la concentration en azote dans l'oxyde de grille

Pour les technologies sub120nm, la nitruration plasma permet d'incorporer une grande quantité d'azote et de limiter les courants de fuite des transistors en augmentant l'épaisseur physique de l'oxyde de grille pour une même épaisseur électrique. Cette technique permet d'introduire des doses d'azote atteignant 10^{16} at/cm², réparties dans tout le volume de l'oxyde. L'étape de nitruration par plasma est suivie d'un recuit à haute température, qui a pour but de "reconstruire" la couche nitrurée par plasma, et de la stabiliser. Ce recuit est effectué en chambre RTP, à une température comprise entre 800°C et 1100°C, pendant un temps court, de l'ordre de 10 secondes sous O₂, et à faible pression (de l'ordre de 10 mTorr).

En phase de production, aucune mesure physique ne permet de caractériser le profil d'azote dans l'oxyde de grille. La modélisation par plan d'expérience apparaît donc ici comme nécessaire afin de prédire l'influence des principaux facteurs de procédés sur ce profil à savoir :

- La pression du plasma de dépôt,
- Le temps de procédé.
- La puissance RF du générateur,

La Figure 86 décrit l'évolution du profil d'azote en fonction des conditions expérimentales. En fonction des conditions, la concentration d'azote varie en valeur moyenne et également en terme de profil ; le point d'inflexion situé à 15Å de profondeur étant plus marqué pour des conditions de pression élevées.

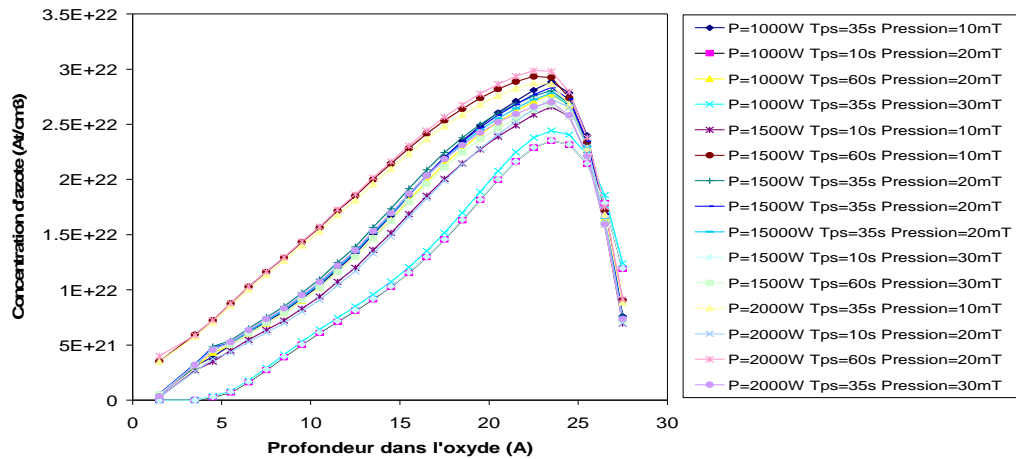


Figure 86. Profils d'azote en fonction des conditions expérimentales de nitruration plasma.

L'objectif de la modélisation du profil d'azote est de pouvoir prédire, à l'aide du système FDC, les variations d'azote dans l'oxyde en fonction des conditions de pression, puissance RF et temps de procédé ; Le modèle de ce profil devant prendre en compte le profil général de l'azote dans l'oxyde. Le modèle peut être établi en utilisant 2 approches :

- La régression polynomiale paramétrique. Notons X la profondeur dans l'oxyde et Y la concentration d'azote correspondante. La fonction paramétrique reliant Y à X est définie par :

$$Y = a_{fct(P, Tps, Pression)} + b_{fct(P, Tps, Pression)} \cdot X + c_{fct(P, Tps, Pression)} \cdot X^2 + \dots$$

Dans notre cas d'étude, la modélisation des coefficients de corrélation a, b, c,.... en fonction des 3 facteurs expérimentaux est mauvaise. La modélisation polynomiale paramétrique n'est donc pas adéquate dans notre cas d'étude. La modélisation polynomiale nécessite donc une relation pour chaque jeu de condition expérimentale :

$$Y_{(P=1000W \ Tps=35s \ Pression=10mT)} = -5.10^{15}X^6 + 3.10^{17}X^5 - 1.10^{19}X^4 + 2.10^{20}X^3 - 1.10^{21}X^2 + 5.10^{21}X - 5.10^{21}$$

$$Y_{(P=2000W \ Tps=35s \ Pression=30mT)} = -4.10^{15}X^6 + 3.10^{17}X^5 - 1.10^{19}X^4 + 2.10^{20}X^3 - 1.10^{21}X^2 + 5.10^{21}X - 5.10^{21}$$

Une régression d'ordre 6 est nécessaire afin d'obtenir une bonne qualité du modèle. La modélisation polynomiale n'apparaît donc pas comme la meilleure solution pour la prédiction du profil d'azote en fonction des conditions expérimentales.

- L'apprentissage par réseaux de neurones. La Figure 87 présente les résultats de modélisation obtenus après apprentissage d'un réseau à 3 neurones cachés répartis en 1 seule couche.

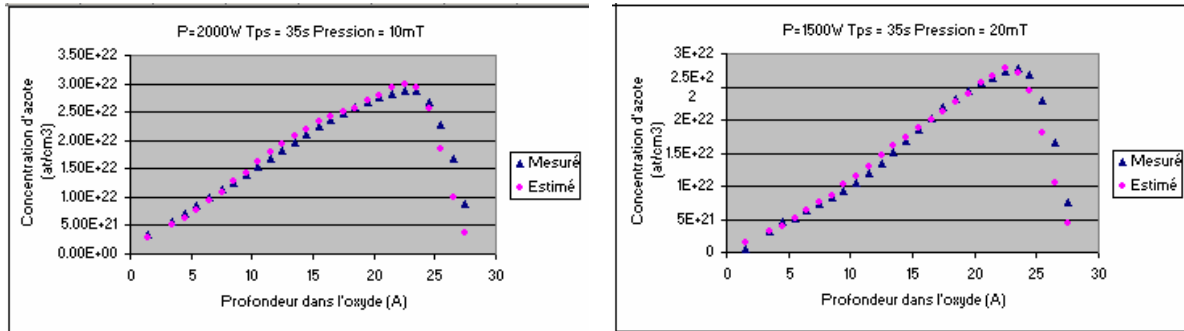


Figure 87. Comparaison entre les profils d'azote mesuré et prédit par le modèle neuronal.

Les résultats obtenus avec le modèle neuronal montre une excellente qualité de prédiction du profil d'azote en fonction des conditions de Pression, Puissance RF et temps de procédé. La modélisation neuronale est l'approche la mieux adaptée à la prédiction du profil d'azote en fonction des conditions expérimentales. Ainsi, à partir des valeurs des paramètres de Pression, Puissance RF et temps de procédé, le modèle statistique établi est capable de prédire le profil d'azote dans l'oxyde de silicium.

En conclusion, les analyses de modélisation entre les paramètres des équipements d'oxydation rapide et les mesures physiques associées ont démontrées :

- Une faible qualité de modélisation de la croissance d'oxyde due à la faible variabilité des mesures physiques,
- Une excellente qualité de la modélisation neuronale du profil d'azote dans l'oxyde de grille. Les résultats obtenus avec cette approche étant significativement meilleurs que les résultats de la modélisation polynomiale grâce notamment à l'aspect "apprentissage" des réseaux de neurones.

Le paragraphe suivant expose les résultats de modélisation entre les paramètres des équipements de dépôt à haute température et les mesures physiques correspondantes.

IV.2- Modélisation du comportement des procédés de dépôt du polysilicium à haute température

Sur le site de Crolles 2, le dépôt du polysilicium est effectué dans des minis fours de type LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) acceptant un lot de 25 plaques.

IV.2.a- Description du procédé de dépôt LPCVD

La Figure 88 présente une vue schématique d'un four fourni par l'équipementier TEL. Le four est constitué d'éléments chauffants (1) qui englobent le tube (2) au sein duquel ont lieu les réactions chimiques.

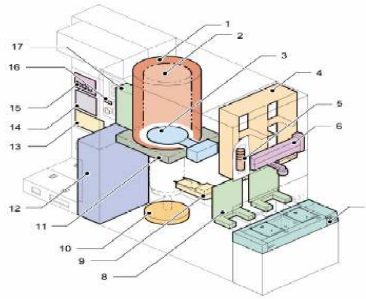
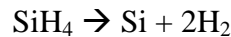


Figure 88. Représentation schématique d'un four LPCVD de type Tokyo Electron – TEL.

Le dépôt du polysilicium est réalisé en plaçant les plaques dans une enceinte sous faible pression, à haute température et sous flux de Silane (SiH_4). Le silane entre dans le réacteur par convection. Il se décompose à l'approche de la plaque selon la réaction ci dessous. Le silicium est adsorbé et diffuse vers des sites stables et le di hydrogène se désorbe [KAMMINS 1988].



Les principaux paramètres influant du dépôt sont [WANG 2002], [ZHANG 2002]:

- La température à la surface de la plaquette définie par la puissance appliquée aux différentes zones de chauffage,
- La pression dans la chambre,
- Le débit de silane.

Comme nous l'avons constaté dans le paragraphe III.2 de ce chapitre, la vitesse de dépôt dépend de l'épaisseur cumulée dans la chambre de réaction depuis le dernier nettoyage.

Le contrôle du procédé de déposition du polysilicium est assuré en mesurant deux plaques témoins situées en haut et en bas du four. Aucune mesure sur les plaques de production n'est effectuée, les variations observées sur les plaques témoins étant jugées représentatives de l'ensemble du procédé de fabrication. La Figure 89 présente la reconstruction du profil d'épaisseur de polysilicium à partir des 17 points mesurés sur les 2 plaques témoins.

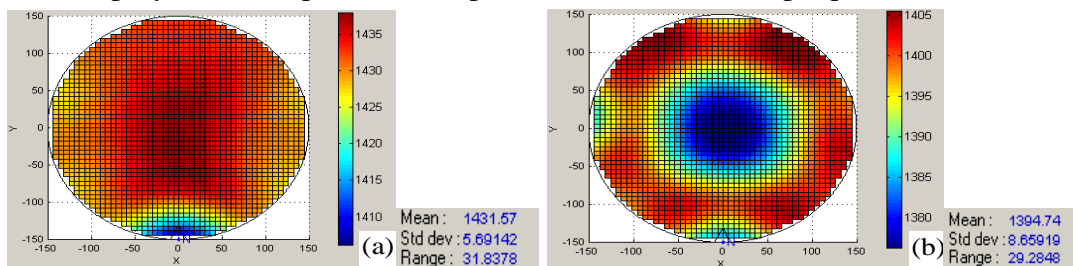


Figure 89. Reconstruction du profil d'épaisseur des plaques témoins utilisées lors du dépôt polysilicium. (haut (a) et bas (b) du four).

La figure ci-dessus montre une différence entre les deux profils mesurés ; Nous notons également que l'épaisseur de polysilicium déposée en bas du four est moins uniforme qu'en haut. Dans ce paragraphe, nous nous proposons d'expliquer les variations des mesures sur témoins à

l'aide des paramètres des équipements. La gamme de variation des paramètres collectés par le système FDC lors de l'étape principale de la recette de déposition est présentée en Annexe 8.

IV.2.b- Résultats des analyses et interprétation

Les analyses statistiques multivariées indiquent une bonne explicativité des variations de la moyenne ainsi que de la dispersion de l'épaisseur de polysilicium.

Modélisation de la moyenne de l'épaisseur de polysilicium déposée

Respectivement 64% et 68% des variations d'épaisseur moyenne des plaques témoins situées en haut et bas du four sont corrélées à des variations de paramètres FDC. Le principal paramètre corrélé à ces variations représente la température de la zone correspondante. Une augmentation de température au niveau de ces zones de chauffage implique une augmentation de l'épaisseur moyenne déposée : Ceci se traduisant, pour le procédé de dépôt du polysilicium, par une épaisseur plus grande au centre de la plaque.

Modélisation de la dispersion intra plaque de l'épaisseur de polysilicium déposée

Seulement 25% de la variabilité intra plaque des mesures effectuées sur les témoins situés en haut du four sont expliquées par des variations de paramètres FDC ; Le contributeur majeur étant la température de la zone de chauffe du haut du four (Figure 90-a).

Près de 39% des variations intra plaques des témoins localisés en bas du four sont expliquées par des variations de paramètres FDC ; Ici encore, le principal paramètre corrélé est la température en bas du four LPCVD pendant l'étape de dépôt (Figure 90-b).

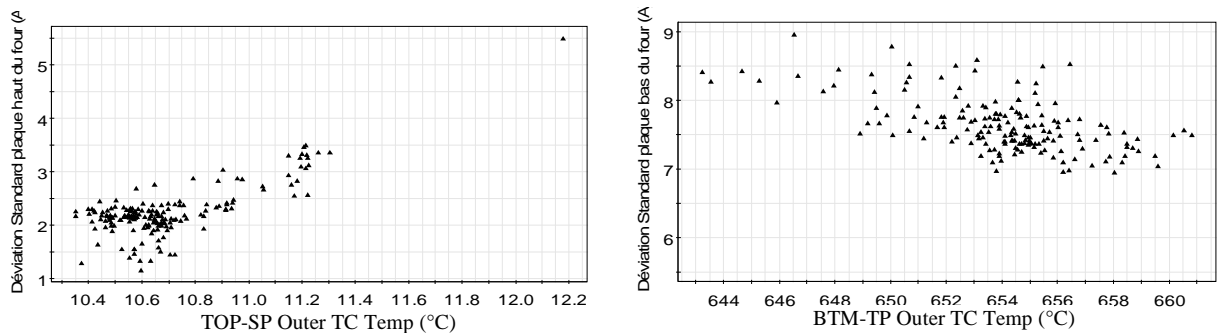


Figure 90. Influence des températures du four sur la dispersion des épaisseurs de polysilicium déposées.

L'augmentation de l'écart type des mesures d'épaisseur de polysilicium est principalement due à la zone centrale. D'après la reconstruction de profil présentée en Figure 89 et les résultats obtenus ci dessus, un accroissement de température se traduit :

- Pour les plaques situées en haut du four (ayant un profil convexe), d'une augmentation de la dispersion de l'épaisseur déposée : L'épaisseur déposée est quasiment la même sur les bords et plus forte au centre,

- Pour les plaques situées en bas du four (ayant un profil concave), d'une diminution de la dispersion de l'épaisseur déposée : Cette épaisseur déposée reste similaire sur les bords mais devient plus importante au centre.

IV.2.c- Optimisation du plan de contrôle du dépôt de Polysilicium

Les analyses de corrélation multivariées précédentes ont permis d'expliquer une partie de la variabilité des mesures physiques en fonction de la température de certaines zones du four. Les modèles utilisés peuvent par conséquent être utilisés pour calculer les limites de contrôle appropriées pour chacun des indicateurs FDC mis en évidence par les analyses multivariées.

	Contrôle SPC		Contrôle FDC		
	Limite de contrôle basse (Å)	Limite de contrôle haute (Å)	Paramètre FDC corrélé	Limites de contrôle basse proposée (°C)	Limites de contrôle haute proposée (°C)
Témoin en haut du four	1410	1450	TOP-SP Outer TC temp	625	615.2
Témoin en bas du four			BTM-TP inner TC temp	630	615.4

Tableau 21. Optimisation du plan de contrôle FDC des fours de dépôt du polysilicium.

Nous pouvons également émettre l'hypothèse que les variations de l'écoulement du SiH₄ dans le four, paramètre FDC non collecté, jouent un rôle sur la dispersion intra plaque du polysilicium.

La modélisation des variations des procédés de dépôt du polysilicium a permis de quantifier l'impact des variations de température sur l'épaisseur déposée. L'optimisation du plan de contrôle FDC a ainsi pu être effectué en se basant sur les modèles obtenus.

IV.3- Modélisation du comportement du procédé de gravure de la grille en polysilicium

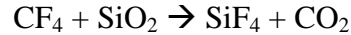
La gravure de la grille permet d'élaborer la partie active du transistor. Pour la technologie 90nm, la gravure de la grille est effectuée dans des chambres LAM TCP. L'équipement utilisé pour ce procédé ayant été présenté dans le chapitre 3, nous ne reviendrons donc pas sur son fonctionnement.

IV.3.a- Procédé de gravure grille

Pour la technologie 90nm, le procédé de gravure grille se décompose en 7 étapes :

- La gravure de la couche antiréfléctive – BARC. La chimie utilisée est O₂ / CHF₃ et HBr. La gravure de la couche BARC s'appuie sur une Détection de Fin d'Attaque optique – DFA basée sur la mesure d'intensité de la raie de longueur d'onde $\lambda=450\text{nm}$, caractéristique de l'espèce CO,

- L'étape de " trimming " qui consiste à consommer latéralement de la résine afin d'obtenir les dimensions souhaitées,
- La gravure du masque dur en TEOS. Comme pour la gravure des tranchées, l'utilisation d'un masque dur est nécessaire car l'épaisseur de résine déposée est insuffisante (chimie employée : $\text{CF}_4 / \text{He} / \text{CH}_2\text{F}_2$),
- La gravure de l'oxyde natif existant sur le polysilicium (BreakThrough – BT) selon la réaction :



Cette étape est assistée par un fort bombardement ionique.

- La première étape de la gravure principale de la grille (Main Etch 1). Lors de cette étape, environ 80% du polysilicium est consommé. Deux mécanismes interviennent en parallèle :
 - o La gravure du polysilicium : $\text{Cl}_2 + \text{Si} \rightarrow \text{SiCl}_4$

La présence de Chlore permet de graver très rapidement le polysilicium tout en gardant une grande sélectivité par rapport à l'oxyde de grille. Cette gravure est assistée par les ions.

- o La passivation des flancs selon la réaction suivante : $\text{HBr} + \text{O}_2 + \text{Si} \rightarrow \text{SiBr}_x\text{O}_y$

Les polymères SiBr_xO_y se déposent sur toute la surface de la plaque, et notamment sur les flancs des motifs gravés. Par effet de bombardement ionique, les polymères en surface sont gravés, mais pas ceux situés sur les flancs. Les polymères ainsi générés protègent le polysilicium en le protégeant de la gravure chimique.

L'utilisation du composé HBr permet essentiellement de passiver les flancs et d'augmenter la sélectivité par rapport à la résine. L'oxygène permet d'augmenter la sélectivité de la gravure par rapport à l'oxyde. L'addition de CF_4 permet de graver à vitesse sensiblement égale, le polysilicium dopé P et celui dopé N. Il permet également de réduire la quantité d'agents polymérisant durant la gravure (limitation de l'épaisseur de résine sur les flancs), la non-uniformité bord-centre de la gravure et les effets de charges sur les flancs de la gravure.

Cette étape utilise un interféromètre pour détecter la fin du procédé [BIHARE 2002]. Cette technique permet d'arrêter la gravure lorsqu'il reste environ 300Å de polysilicium.

- La seconde étape de gravure principale de la grille (Main Etch 2). Cette étape, qui ne comporte pas de CF_4 (faible sélectivité par rapport à l'oxyde de grille), permet de graver les 20% de polysilicium restants en respectant l'oxyde de grille. La fin de cette étape est déterminée à l'aide d'une détection de fin d'attaque optique.

- L'étape de surgravure (Over Etch) enlève les résidus de polysilicium qui peuvent rester (surtout dans les zones denses). Cette étape, très sélective par rapport à l'oxyde de grille, utilise une chimie à base de Hbr, He et O2 :
$$\text{HBr} + \text{HeO}_2 + \text{Si} \rightarrow \text{SiBr}_x\text{O}_y$$

La gamme de variation associée à chacun des paramètres FDC collectés lors de la gravure de la grille en polysilicium est présentée en Annexe 9.

IV.3.b- Résultats des modélisations

Trois mesures sont effectuées après la gravure de la grille :

- La longueur de la grille en polysilicium : CD - Gravure grille,
- L'épaisseur d'oxyde de grille restant : TH Oxyde - Gravure Grille active,
- L'épaisseur d'oxyde au niveau des tranchées d'isolation : TH Oxyde - Gravure Grille tranchée.

Comme nous l'avons constaté lors des études de modélisations de l'étape de gravure des tranchées, les paramètres de l'équipement collectés par le système FDC ne permettent pas d'expliquer l'ensemble des variations des dimensionnels mesurés.

Modélisation de la variabilité de la largeur de la grille

La variabilité de la longueur de grille est très faiblement expliquée par les paramètres FDC (corrélation inférieure à 5%). Dans le paragraphe précédent (Tableau 18), nous avons déterminé que près de 27% des variations de cette mesure physique proviennent d'étapes antérieures. Cela montre qu'environ 70% de la variabilité de la longueur de grille n'est pas expliquée.

Modélisation de la variabilité des épaisseurs d'oxyde après la gravure de la grille

Environ 30% des variations de l'épaisseur moyenne (moyenne des 17 points de mesure physiques) d'oxyde de grille après gravure sont corrélées au paramètre "BiasMatchSeriesCapPositionAIRreading" pendant la seconde étape de gravure principale du polysilicium (Figure 91). Ce paramètre représente la valeur d'une des capacités d'ajustement du générateur RF situé au niveau du chuck électrostatique. Il ne pointe pas la cause de la variabilité de la mesure physique mais souligne un changement d'impédance de la chambre et par conséquent une modification des caractéristiques du plasma.

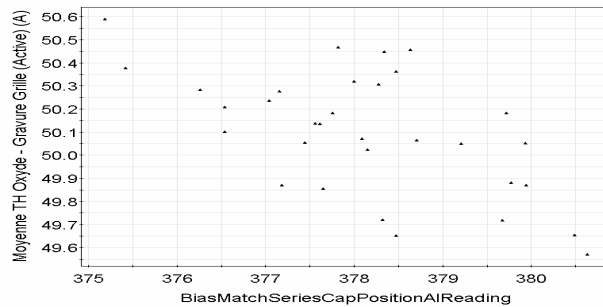


Figure 91. Corrélation entre l'épaisseur d'oxyde de grille restante après gravure et la position d'une capacité d'ajustement du générateur RF.

17% de la variabilité des mesures d'épaisseur d'oxyde au niveau des tranchées (après gravure grille) sont corrélées à des variations des paramètres FDC ; Le principal paramètre corrélé étant, comme précédemment, le paramètre "BiasMatchSeriesCapPositionAIRReading" pendant la seconde étape de gravure principale du polysilicium (Figure 92).

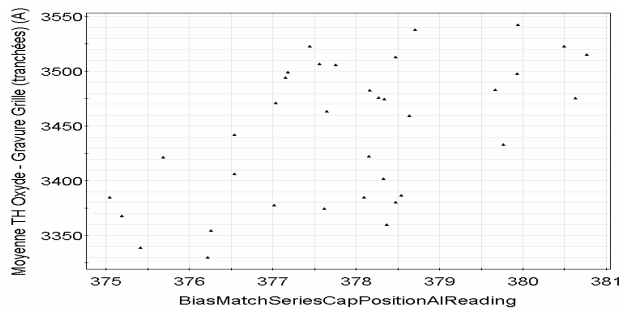


Figure 92. Corrélation entre l'épaisseur d'oxyde de grille restante après gravure et la position d'une capacité d'ajustement du générateur RF.

La variabilité de l'écart type des 17 points de mesures d'épaisseur d'oxyde ne sont pas expliqués par les variations des paramètres FDC collectés.

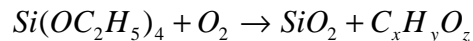
Les modélisations multivariées effectuées entre les paramètres des équipements de gravure grille et les mesures physiques post-procédé indiquent une faible représentativité des indicateurs FDC ; Un très faible pourcentage de la variabilité des mesures physiques pouvant être expliqué par des variations des paramètres FDC collectés. Des études destinées à caractériser les phénomènes de la gravure ont montrée [CUNGE 2004] que l'état des parois joue un rôle primordial sur les conditions de procédé et par conséquent les dimensions des motifs gravés. Aucun paramètre FDC ne permettant à l'heure actuelle de caractériser ce phénomène, nous ferons ici l'hypothèse que la variabilité des mesures physiques non expliquée peut être associée à l'état des parois du réacteur plasma.

IV.4- Modélisation du comportement des procédés de déposition du TEOS à haute température

Les procédés de dépôt TEOS Offset et Spacer utilisent, comme pour le dépôt polysilicium, des équipements de type LPCVD. Nous ne reviendrons donc pas sur la description du four, celui-ci étant identique à l'équipement utilisé pour le dépôt du polysilicium de grille.

IV.4.a- Procédé de dépôt TEOS

Le dépôt de l'oxyde de silicium se fait par l'intermédiaire du TEOS (Tétra Ethyl Ortho Silicate), liquide visqueux (à 1.5 Bar) qui est vaporisé avant d'être envoyé dans la chambre de Process à 400 mTorr. La réaction est la suivante :



D'un point de vue physique les paramètres critiques du procédé à contrôler sont identiques aux paramètres identifiés lors de l'analyse du dépôt polysilicium. Les procédés de dépôt TEOS offset et spacer sont contrôlés en mesurant uniquement les plaques témoins placées dans le four.

IV.4.b- Résultats des modélisations du comportement des procédés de dépôt TEOS Offset et Spacer

Contrairement aux modélisations du dépôt polysilicium, les paramètres FDC collectés lors des procédés de dépôt TEOS offset et spacer ne sont pas représentatifs de la variabilité des mesures physiques. Les analyses multivariées expliquent respectivement 10% et 12% des variations des mesures d'épaisseur de TEOS après les dépôts offset et spacer. Nous admettrons que les variations de température du four lors du procédé sont trop faibles pour l'influencer l'épaisseur déposée sur les plaques témoins. D'autres phénomènes tels que la convection des gaz ou la pression dans la chambre, non contrôlées par le système FDC, peuvent également contribuer à la variabilité de l'épaisseur déposée.

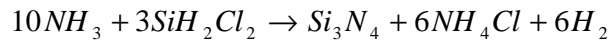
Du à ce faible pourcentage de corrélation entre l'épaisseur déposée et les paramètres FDC, l'optimisation du plan de contrôle FDC n'est pas possible en utilisant la variabilité naturelle des mesures de production.

IV.5- Modélisation du comportement des procédés de déposition du nitrure à haute température

Les procédés de dépôt Nitrure Offset et Spacer utilisent, des équipements de type LPCVD. Nous ne reviendrons donc pas sur la description du four, celui-ci étant identique à l'équipement utilisé pour les dépôts polysilicium et TEOS.

IV.5.a- Procédé de dépôt Nitrure

Le dépôt Nitrure se fait par injection de gaz dichlorosilane (SiH_2Cl_2) et NH_3 selon la réaction :



Les produits de réaction sont le nitrure déposé sur la plaque et le chlorure d'ammonium qui est pompé. D'un point de vue physique les paramètres critiques du procédé à contrôler sont :

- La température de la plaque définie par la température de chacune des zones de chauffage,
- La pression dans l'enceinte,
- Les débits des gaz NH_3 et dichlorosilane SiH_2Cl_2 .

L'ensemble des paramètres collectés par le système FDC, leur signification ainsi que leur gamme de variation lors de l'étape principale de dépôt est présenté en Annexe 10. Nous noterons que lors de l'extraction des données, certains paramètres d'entrées contrôlant la pression et la température des gaz étaient collectés. D'autres, tels que les débits des gaz de NH_3 et SiH_2Cl_2 n'étaient pas enregistrés.

Le procédé de dépôt nitrure offset est contrôlé en mesurant uniquement les plaques témoins placées dans le four. Cependant, à la suite de l'opération de dépôt nitrure spacer, deux mesures physiques sont effectuées :

- Sur les plaques témoins situées en haut et en bas du four,
- Mais également sur les plaques de production localisées, pour un ensemble de 25 plaques au centre du four. La position des plaques n'étant pas identifiées pour des lots de moins de 25 plaques, l'étude de variabilité est seulement réalisée sur des lots complets de 25 plaques.

L'analyse multivariée des principaux contributeurs des variations du procédé de dépôt étudiera la variabilité de ces deux mesures pour le dépôt spacer.

IV.5.b- Résultats des modélisations des procédés de dépôt nitrure Offset et Spacer

Analyse des plaques de production mesurées après le dépôt nitrure spacer

Les analyses multivariées indiquent une "explicativité" relativement moyenne de la variabilité de la valeur moyenne et de l'écart type des mesures sur *les plaques de production* avec les paramètres FDC :

- 38% de la variabilité de l'épaisseur de nitrure après dépôt est expliquée à l'aide des paramètres FDC. Contrairement aux modélisations du dépôt polysilicium, le principal contributeur de la variabilité de l'épaisseur moyenne déposée n'est pas la température

pendant l'étape principale de dépôt mais pendant le chargement des plaques (Figure 93). Une augmentation de température se traduit par une augmentation de l'épaisseur déposée. L'hypothèse la plus vraisemblable est que l'étape du chargement des plaques influence le conditionnement de la chambre de dépôt est par conséquent celui des plaques (impacte l'initialisation de la croissance en surface).

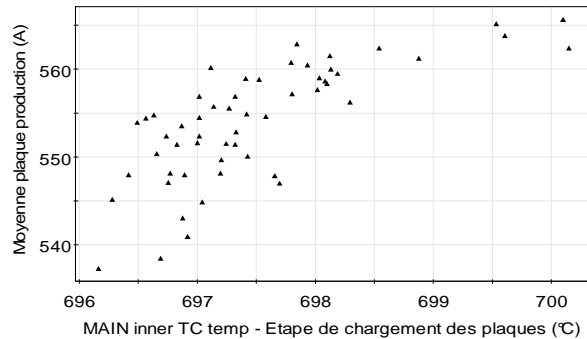


Figure 93. Influence de la température centrale du four sur l'épaisseur de nitrure offset déposée sur les plaques de production.

- 24 % de la variabilité de l'écart type sur les plaques de production est expliquée par des variations de paramètres de l'équipement collectés. Les variations de dispersion sont principalement corrélées à la température centrale du four lors du chargement des plaques dans l'équipement

Analyse des plaques témoins mesurées après les dépôt nitrure offset et spacer

Les analyses de compréhension de la variabilité des mesures sur *les plaques témoins* montrent une faible explicativité de ces mesures pour les dépôts offset et spacer :

- Les variations de valeur moyenne des épaisseurs déposées en haut et en bas du four ne sont pas expliquées par les paramètres FDC collectés par l'équipement.
- La variabilité de l'écart type intra-plaque des mesures sur les plaques témoins situées au bas du four est également très peu expliquée par les paramètres de l'équipement de procédé.
- Cependant, 30% de la variabilité de la dispersion des mesures effectuées sur les plaques situées en haut du four est expliquée. La Figure 94 présente les relations entre cette grandeur statistique et les deux principaux paramètres corrélés : les températures TOP-SP et TOP-S (température des 2 zones de chauffe située en haut du four).

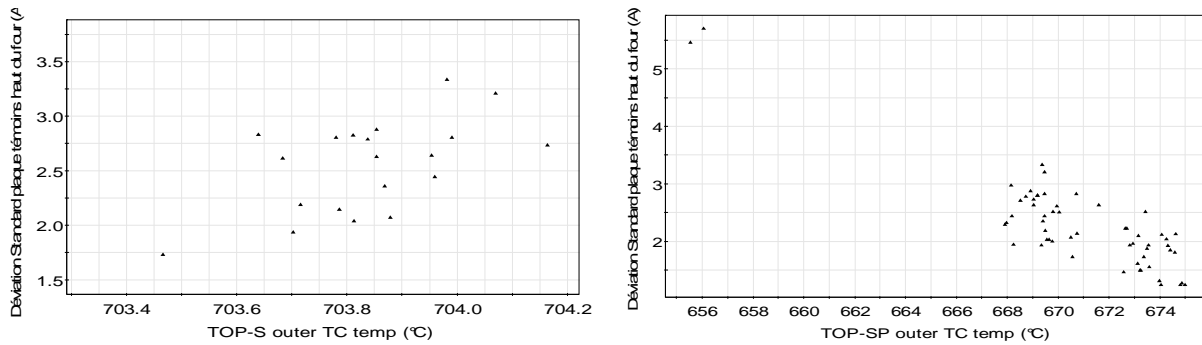


Figure 94. Influence des températures TOP-SP et Top-S sur la dispersion des plaques témoins lors du dépôts nitrure offset.

IV.5.b- Optimisation du plan de contrôle FDC

La modélisation du comportement des fours de dépôt nitrure offset et spacer permettent d'expliquer environ 30% de la variabilité des mesures physiques réalisées à posteriori sur les plaques de production. Concernant les paramètres FDC statistiquement significatifs, il est possible d'en ajuster les limites de contrôle, en accord avec celles associées aux mesures physiques.

	Contrôle SPC		Contrôle FDC		
	Limite de contrôle basse (Å)	Limite de contrôle haute (Å)	Paramètre FDC corrélé	Limites de contrôle basse proposée (°C)	Limites de contrôle haute proposée (°C)
Moyenne – TH Nitrure - Dépôt Spacer	533	567	Main inner TC temp – Etape de Chargement des plaques	696	700

Tableau 22. Optimisation du plan de contrôle FDC des fours de dépôt nitrure Spacer.

La compréhension de la variabilité des mesures physiques après les dépôts nitrure offset et spacer à l'aide des paramètres FDC collectés a permis de caractériser la pertinence des indicateurs FDC. Les résultats analyses multivariées ont permis d'ajuster les limites de contrôle sur les paramètres FDC pertinents collectés lors du dépôt spacer. La variabilité des mesures sur les plaques témoins est cependant faiblement expliquée par les paramètres FDC.

IV.6- Modélisation du comportement du procédé de gravure Offset

L'offset permet de limiter la diffusion des espèces implantées sous le canal et ainsi diminuer les effets de canaux courts. Pour la technologie 90nm, la gravure de l'offset est réalisée dans des chambres de type LAM utilisant la technologie "Dual Frequency Confined". La Figure 95 propose une représentation schématique de la chambre de gravure utilisée pour la gravure offset. Contrairement aux équipements de type LAM TCP, ce type de technologie utilise deux générateurs RF fonctionnant à des fréquences voisines de 2MHz et 27MHz (la fréquence 27MHz favorisant plutôt la dissociation des espèces par augmentation significative de l'effet stochastique

et la création du plasma et la fréquence 2MHz le bombardement). L'accord d'impédance est réalisé en ajustant la fréquence de chacun des deux générateurs. Le plasma haute densité au dessus de la plaque est assuré par les anneaux de confinement.

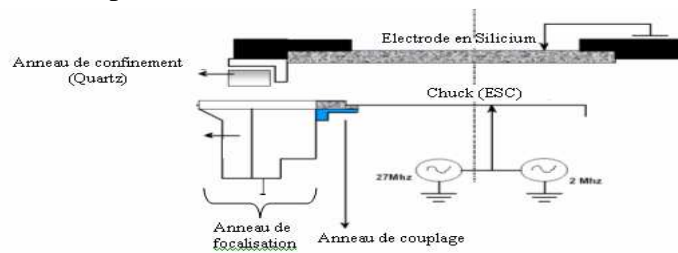
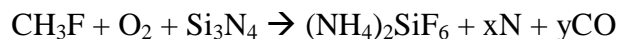


Figure 95. Représentation schématique de la chambre de gravure de type "Dual Frequency Confined".

IV.6.a- Présentation du procédé de gravure offset

Pour la technologie 90nm, le procédé de gravure offset se décompose en 2 étapes principales utilisant toutes les deux uniquement la source RF à 2MHz (les dépôts du TEOS et du nitrure spacer suivant parfaitement le relief obtenus après gravure grille, la gravure doit être le plus anisotrope possible pour la création des espaceurs) :

- L'étape de gravure principale (Main Etch) réalisée à partir d'une chimie Ar / CF₄ / CH₃F / O₂.



L'hydrogène est la principale espèce gravante puisqu'il réagit avec l'azote et permet de former le NH₄ qui réagit à son tour avec le fluor apporté par le CF₄. L'argon sert de gaz porteur et assure le bombardement ionique de la surface. L'oxygène permet de consommer le carbone de la couche de polymères et par conséquent d'augmenter l'efficacité du bombardement ionique sur la surface.

La fin de la gravure principale est basée sur une détection de fin d'attaque qui permet de s'arrêter sur la couche d'oxyde TEOS.

- L'étape de surgravure (Over Etch), sélective par rapport à l'oxyde (sans le gaz CF₄), qui permet d'enlever les résidus de nitrure.

La variabilité de chacun des paramètres collectés par le système FDC lors des deux étapes principales de la gravure offset est présentée en Annexe 11.

IV.6.b- Résultats des modélisations du comportement de la gravure offset

Les résultats des analyses de modélisation multivariées des variations de longueur de l'offset et d'épaisseur de TEOS après gravure sont présentés ci-après.

Modélisation de la variabilité de la largeur de l'offset

Les variations de la valeur moyenne de la largeur de l'offset sont corrélées à 30% aux variations du paramètre "ESCBIASVoltage_AI" pendant l'étape de gravure principale (Figure 96).

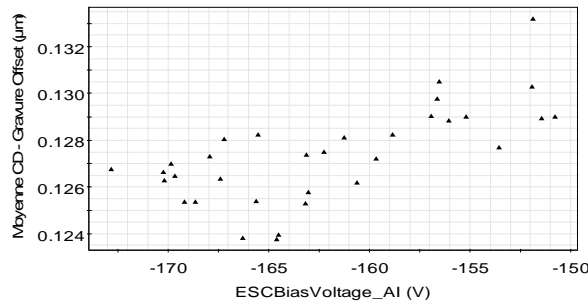


Figure 96. Corrélation entre la largeur de l'offset et le paramètre FDC "ESCBIASVoltage_AI".

Ce paramètre FDC représente la tension mesurée au niveau de la plaque. Une tension faible caractérise une faible énergie de bombardement de la plaque et par conséquent entraîne une largeur d'offset plus importante (la gravure étant essentiellement physique).

La variabilité de la dispersion intra-plaque n'est que très faiblement expliquée dans les paramètres des équipements.

Modélisation de l'épaisseur de TEOS mesurée après la gravure de l'offset

Seulement 10% des variations de l'épaisseur moyenne de TEOS après gravure sont corrélées au temps de l'étape d'Over Etch. A un temps de gravure important correspond une épaisseur de TEOS faible.

Environ 31% de la variabilité de la dispersion intra plaque de l'épaisseur de TEOS est expliquée par les variations du temps de surgravure (ProcessTime) et d'intensité de l'émission optique 4 (IBValue 4) collectées lors de la gravure principale (Figure 97).

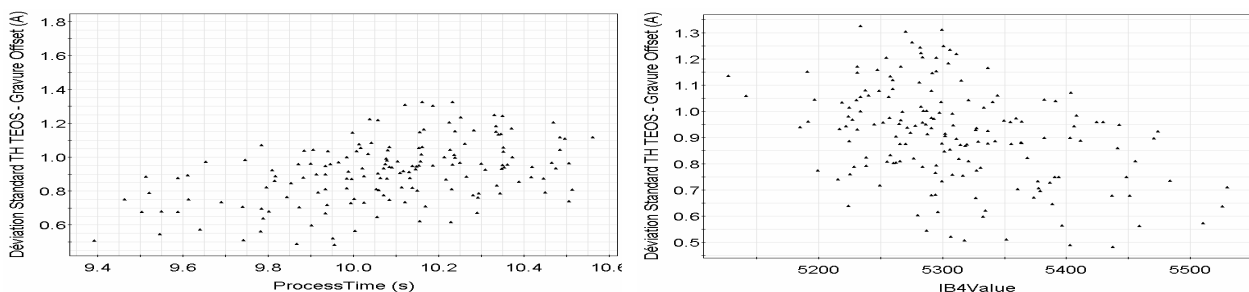


Figure 97. Corrélations entre le temps de sur gravure, l'intensité de l'émission optique 4 et l'écart type intra-plaque de l'épaisseur de TEOS après gravure offset.

Un temps de surgravure élevé participe à une augmentation de la variabilité intra plaque de l'épaisseur de TEOS se traduisant par une hausse des différences entre les épaisseurs au bord et au centre de la plaque.

La relation statistique entre la dispersion de l'épaisseur de TEOS après gravure et l'intensité des raies d'émission optique traduit un changement d'état du plasma pendant l'étape

principale de gravure. Les émissions optiques 3 & 4 caractérisent respectivement les raies SiF₂ (λ = 390nm) et CO (λ = 520nm). Une diminution de l'intensité de ces raies, caractéristiques des espèces produites par la réaction entre le CH₃F, O₂ et Si₃N₄, traduit un ralentissement de la réaction chimique ; Ceci conduisant à une augmentation de l'écart de l'épaisseur de TEOS après gravure entre le bord et le centre de la plaque.

IV.6.c- Optimisation du plan de contrôle de la gravure offset

La qualité des modélisations de la dimension de l'offset et de l'épaisseur de TEOS en fonction des paramètres de l'équipement de gravure permettent d'envisager un ajustement du plan de contrôle FDC, en particulier concernant les paramètres pertinents précédemment énumérés.

	Contrôle SPC		Contrôle FDC		
	Limite de contrôle basse (Å)	Limite de contrôle haute (Å)	Paramètre FDC corrélé	Limites de contrôle basse proposée	Limites de contrôle haute proposée
Moyenne – TH TEOS - Gravure Offset	82	98	Process Time	9.2 s	11 s
Dispersion – TH TEOS - Gravure Offset	0.2	2.2	Process Time	9.2s	
			IB4 Value		5700
Non définie car domaine de variation de la mesure physique trop faible					

Tableau 23. Optimisation du plan de contrôle FDC de la gravure Offset.

Aucun ajustement du plan de contrôle FDC basé sur les dimensions de l'offset n'est proposé à cause de la faible variabilité de ces mesures par rapport aux limites de contrôle SPC.

IV.7- Modélisation du comportement du procédé de gravure des espaceurs – gravure spacer

La gravure spacer permet de définir les zones à protéger avant les implantations Source et Drain. Pour la technologie 90nm et comme pour la gravure offset, cette gravure est réalisée dans des chambres de type LAM utilisant la technologie "Dual Frequency Confined".

IV.7.a- Présentation du procédé de gravure spacer

Pour la technologie 90nm, le procédé de gravure spacer est composé principalement de 3 étapes utilisant uniquement la puissance 2MHz :

- Une première étape de gravure principale en temps fixe (Main Etch 1). La chimie utilisée est identique à celle employée lors de la gravure offset (Ar / CF₄ / CH₃F / O₂).

- Une seconde étape de gravure principale utilisant un système de détection de fin d'attaque (Main Etch 2).
- Une étape de surgravure en temps fixe (Over Etch) utilisant une chimie contenant moins de gaz CF_4 que la gravure principale afin d'être plus sélectif par rapport à l'oxyde TEOS.

L'Annexe 12 présente la plage de variation de chacun des paramètres collectés par le système FDC lors des trois étapes précédemment cités de la gravure des espaceurs.

IV.7.b- Résultats des modélisations du comportement de la gravure spacer

Les résultats des analyses de modélisation multivariées des variations de la largeur des espaceurs et d'épaisseur de TEOS après gravure sont présentés ci-dessous :

- 25% de la variabilité de la longueur moyenne des espaceurs par plaque est corrélée à des variations de paramètres de l'équipement de gravure. La puissance envoyée par le générateur 2MHz ainsi que la tension mesurée au niveau de l'ESC sont les deux principaux paramètres reliés aux variations de longueur des espaceurs.

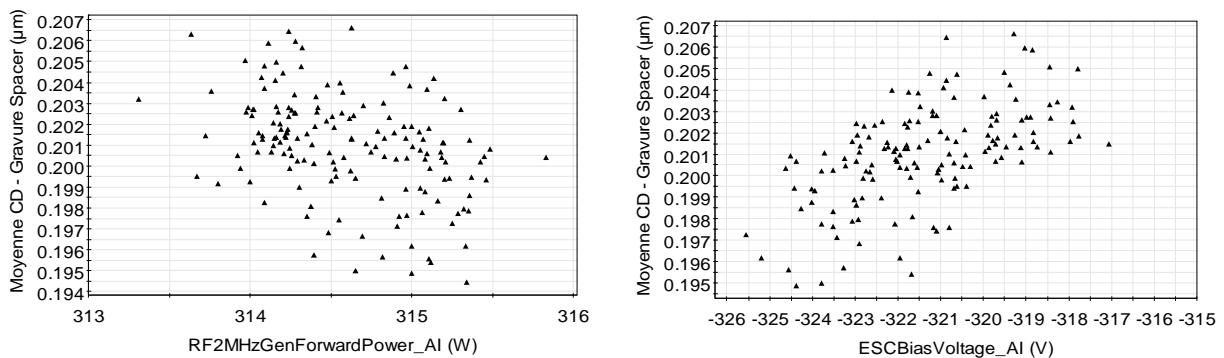


Figure 98. Corrélation entre la largeur des espaceurs et les paramètres FDC "RF2MHzGenForwardPower_AI" et "ESCBiasVoltage_AI"

L'accroissement de la puissance fournie par le générateur 2MHz augmente l'énergie des ions. Ce phénomène se traduit par une hausse de la vitesse de gravure. La largeur des espaceurs obtenue est donc moins importante.

De plus, l'augmentation de la puissance envoyée entraîne une hausse du bombardement ionique et par conséquent une augmentation en valeur absolue de la tension de l'ESC.

- Les modélisations des variations des dispersions intra-plaque de la longueur des espaceurs et de l'épaisseur de TEOS ainsi que de l'épaisseur moyenne de TEOS indiquent peu de corrélations avec les paramètres équipements collectés pendant le procédé.

Deux paramètres collectés par le système FDC expliquent près de 25% de la variabilité de la gravure spacer. Une première optimisation du plan de contrôle FDC basée sur les modèles obtenus est réalisable.

	Contrôle SPC		Contrôle FDC		
	Limite de contrôle basse (μm)	Limite de contrôle haute (μm)	Paramètre FDC corrélé	Limites de contrôle basse proposée	Limites de contrôle haute proposée
Moyenne – CD - Gravure spacer	0.19	0.22	RH2MHzGenForwardPower_AI (W)	312	317
			ESCBiasVoltage_AI (V)	-330	-310

Tableau 24. Optimisation du plan de contrôle FDC de la gravure spacer.

IV.7.c- Optimisation du plan de contrôle FDC par l'utilisation d'un plan d'expérience

L'analyse des corrélations entre les mesures physiques et électriques a permis d'identifier les principales causes de la variance du courant de saturation des transistors à l'état On. Une solution de réduction de cette variance est l'optimisation de la gravure spacer. Dans le paragraphe précédent, l'interprétation d'un plan d'expérience a permis d'établir un nouveau point de fonctionnement pour la gravure spacer en modifiant les paramètres suivants :

- Pression,
- Temps de la sur-gravure,
- Temps de la gravure principale,
- Puissance RF envoyée dans la chambre.

Le plan d'expérience ainsi effectué a augmenté significativement la variabilité de certains paramètres FDC liés aux 4 facteurs cités ci dessus. Dans ce paragraphe, nous nous proposons d'utiliser les données FDC collectés lors du DoE afin d'améliorer les modèles de variations précédemment établis. Ainsi, les variations :

- De pression influencent les paramètres (R^2 du modèle : 98%) :
 - o Processmanometers : mesure de la pression au niveau de la plaque,
 - o Confinement rings : position des anneaux de confinement du plasma,
 - o IBValues : intensité de l'émission des espèces présentes dans le plasma,
 - o RF27MHzFrequency : fréquence d'accord du générateur RF 27MHz.
- De puissance modifient la valeur des paramètres (R^2 du modèle : 99%) :
 - o 27MHzGenForwardPower : puissance envoyée par le générateur RF 27MHz,
 - o ESCBiasVoltage : tension du chuck électrostatique,
 - o IBValues : intensité de l'émission des espèces présentes dans le plasma.
- De temps de procédé jouent sur le paramètre ElapsedProcesstime (R^2 : 96%).

L'excellente qualité des modèles établis (Pression, Puissance, Temps de gravure = fct(paramètres FDC) permet, dans le domaine de variabilité définie par le DoE, de prédire les valeurs du paramètre CD – Gravure spacer et donc d'optimiser le plan de contrôle FDC.

	Contrôle SPC		Facteur du DoE			Contrôle FDC		
	LCB (µm)	LCH (µm)	Facteur corrélé	LCB	LCH	Paramètre FDC corrélé	LCB proposée	LCH proposée
Moyenne – CD - Gravure spacer	0.19	0.21	Pression	60	100	Process manometer (mTorr)	60	100
						Confinement rings	580	690
						RF27MHz Frequency (kHz)	27150	27200
			Temps	15	20	Elapsed process time (s)	15	20

Tableau 25. Optimisation du plan de contrôle FDC de la gravure spacer à l'aide du DoE effectué.

La variabilité de la puissance RF ainsi que du temps de sur-gravure induite par le DoE étant trop faible pour influencer significativement les dimensions des motifs, aucune limite FDC basée sur les modèles établis ne peut être proposée.

Les analyses de modélisation effectuées en considérant la variabilité naturelle des plaques de production ainsi que la variabilité engendrée par le plan d'expérience ont permis de comprendre les variations de dimension des motifs après gravure spacer. Les paramètres FDC pertinents ont ainsi été mis en évidence et leurs limites de contrôle ont été calculées basé sur les modèles statistiques établis. Dans ce paragraphe, nous avons notamment pu souligner l'importance des plans d'expériences qui augmentent significativement la variabilité des paramètres des équipements.

V- Conclusion

Le chapitre IV a quantifié statistiquement l'ensemble des corrélations entre les mesures physiques & électriques et les paramètres des équipements du module grille. La Figure 99 récapitule les corrélations établies (seules les corrélations supérieures à 5% sont représentées).

Cette modélisation statistique a notamment caractérisé la nature et l'origine de la variabilité des courants Ion et Ioff ainsi que de la tension de seuil V_t des transistors. Ceci a ensuite permis d'identifier les opérations de fabrication à améliorer. L'optimisation de la gravure spacer ainsi que la proposition d'implémentation de boucles de régulations au niveau de la gravure grille et du dépôt nitrure spacer pourront permettre de diminuer la variabilité des performances électriques des transistors.

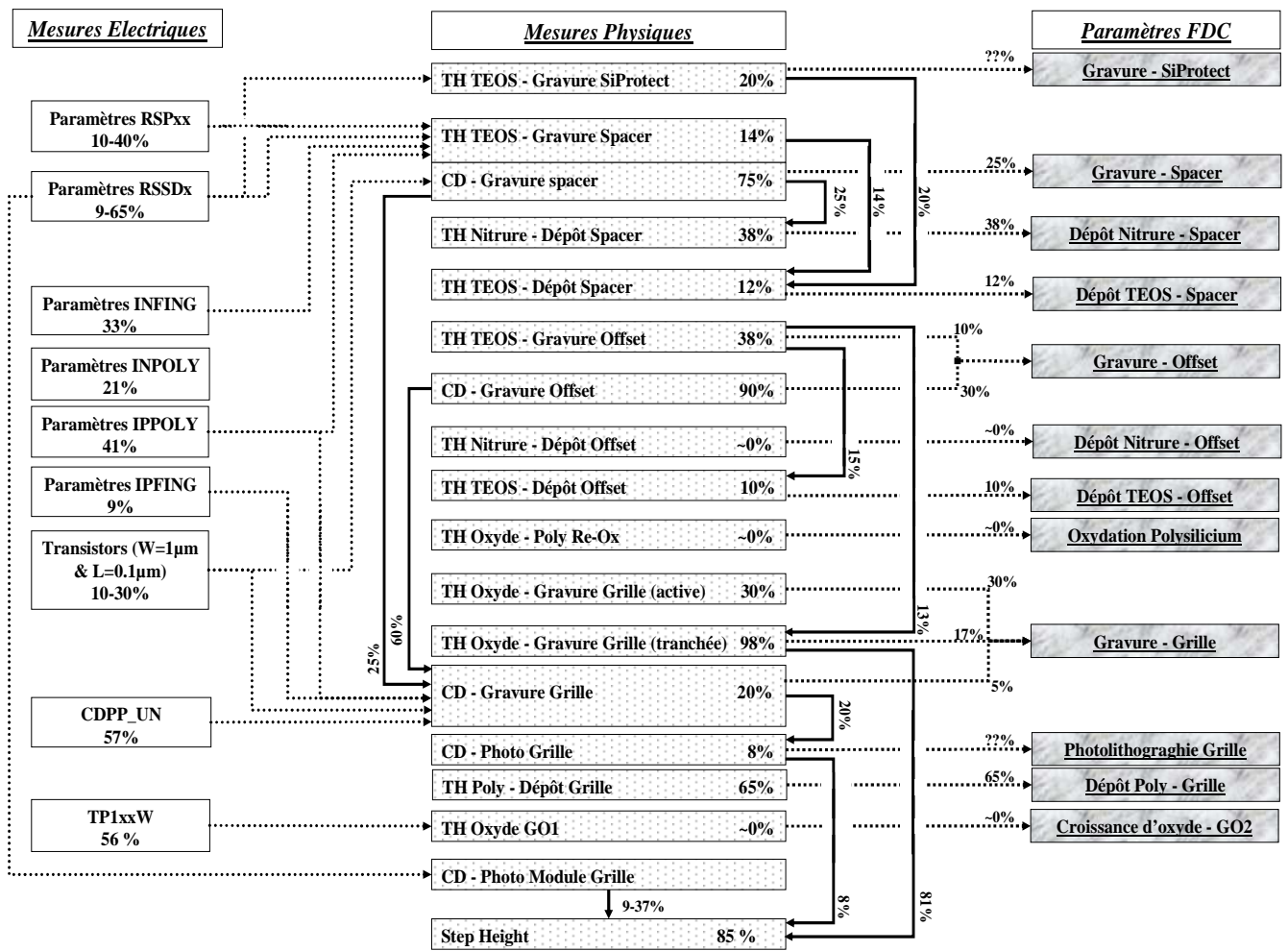


Figure 99. Récapitulatif des corrélations entre l'ensemble des mesures du module grille.

Pour l'ensemble des opérations de fabrication (excepté la photolithographie), la recherche des corrélations entre les mesures physiques et les paramètres FDC ont contribué à l'amélioration du plan de contrôle des équipements de fabrication. Les paramètres FDC pertinents ont ainsi pu être placé sous contrôle.

Finalement l'utilisation des réseaux de neurones a permis de modéliser la concentration de nitrure dans l'oxyde de grille. Le modèle neuronal, plus simple que les modèles polynomiaux, donne des résultats très proche de la réalité.

Chapitre 4

Recherche des liens entre les étapes de fabrication des interconnexions de la technologie 90nm

I-	Introduction	151
II-	Modélisation des interactions entre les opérations de fabrication des interconnexions et analyse de la source de variance des mesures électriques du module métal 2	153
III-	Modélisation des étapes élémentaires employées pour la réalisation des interconnexions	156
IV-	Apports des analyses de modélisation	165
V-	Conclusion	170

Chapitre 4 : Recherche des liens entre les étapes de fabrication des interconnexions de la technologie 90nm

Les deux chapitres précédents se sont intéressés à la modélisation de la variance des mesures électriques et physiques des modules STI et grille. Dans ce chapitre nous nous proposons de modéliser la variabilité des procédés utilisés pour la réalisation des interconnexions. Plusieurs niveaux d'interconnexions sont nécessaires pour connecter les transistors entre eux et obtenir l'architecture souhaitée. Pour la technologie 90nm, on distingue généralement 5 à 6 niveaux de métal suivant les produits (Figure 100).

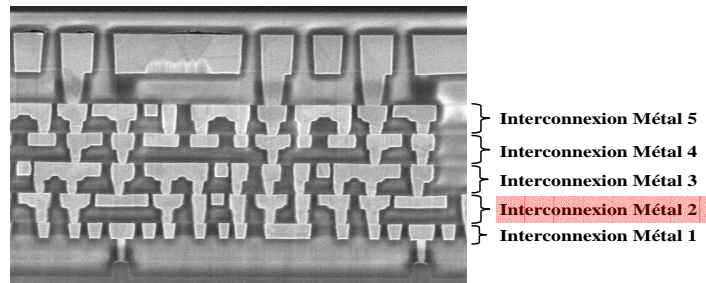


Figure 100. Niveaux d'interconnexion pour la technologie 90nm.

Ce chapitre s'intéresse à la modélisation du niveau d'interconnexion métal 2.

I- Introduction

Un contrôle global des procédés de fabrication nécessite de caractériser la variabilité engendrée au niveau des interconnexions. Pour la technologie 90nm, le module d'interconnexion métal 2 est composé de 15 étapes de fabrication, contrôlées généralement par une opération de métrologie (Figure 101).

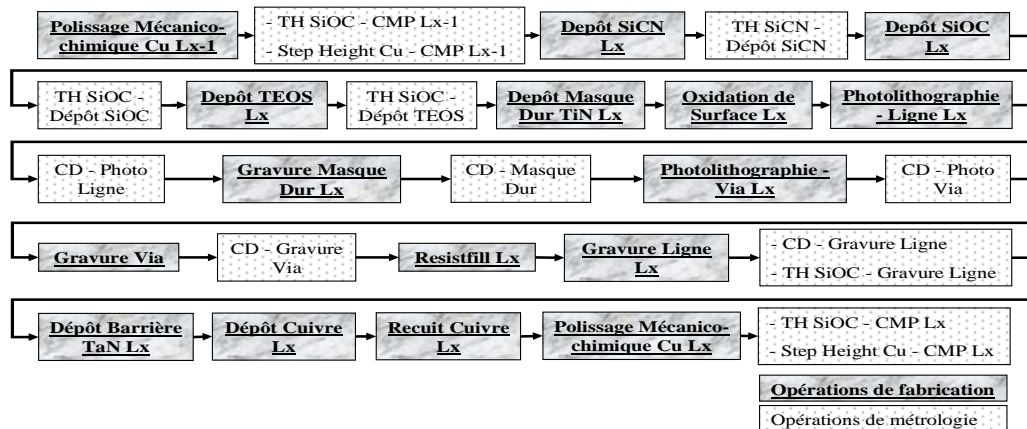


Figure 101. Opérations de fabrication pour l'élaboration des interconnexions pour la ligne x. (TH représente une épaisseur et CD une dimension critique)

La Figure 102 présente la localisation des principales mesures effectuées lors des opérations de métrologie.

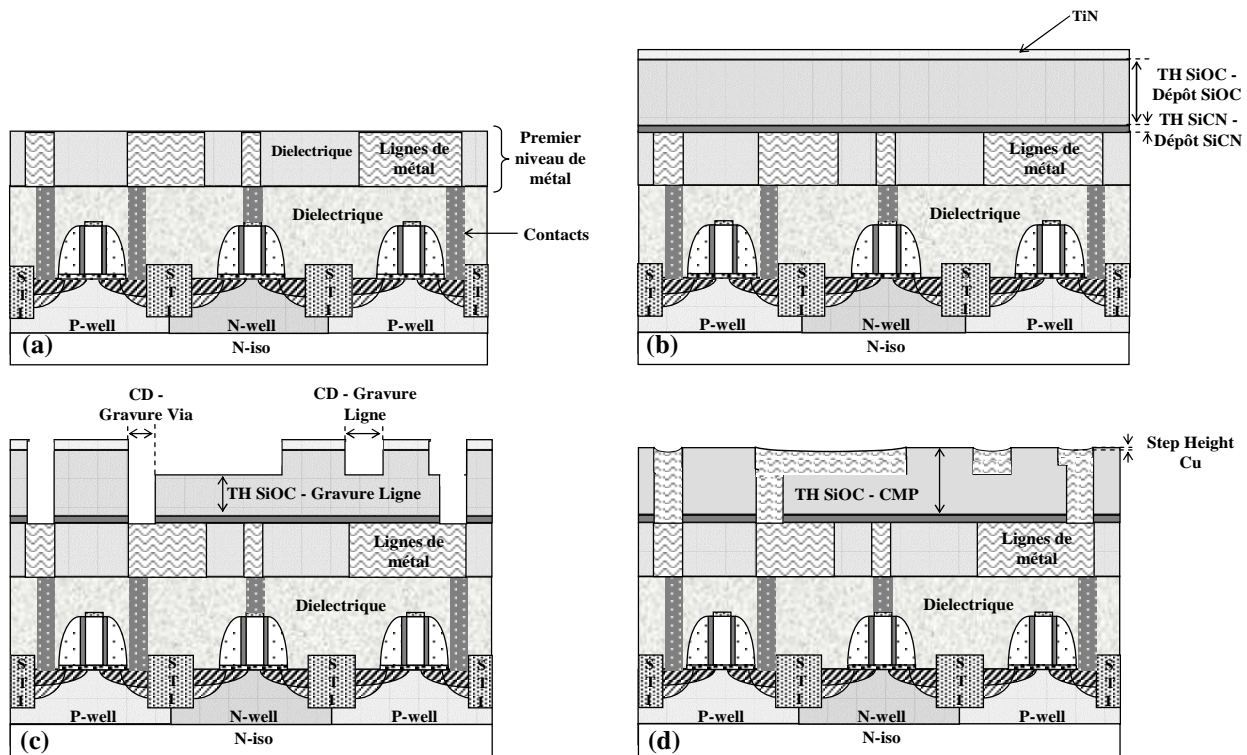


Figure 102. Représentation des principales mesures effectuées dans le module interconnexions.

(A la fin du module métal 1 (a), après l'étape de dépôt du masque dur en TiN (b), après gravure des lignes (c) et après polissage mécano-chimique du Cuivre (d)).

Remarque 1 : une fine couche de Tantale (Ta) est déposée après gravure ligne. Ce dépôt constitue une barrière à la diffusion du cuivre dans le diélectrique (non représentée ici).

Remarque 2 : Le paramètre "TH SiOC – Dépôt TEOS" représente la somme des épaisseurs de SiOC et de TEOS déposées.

Une dizaine de mesures paramétriques permettent de caractériser électriquement la qualité des différentes interconnexions.

1.1- Contexte d'étude

La nécessité de développer un modèle qui puisse représenter de façon précise et robuste l'ensemble des variations des caractéristiques des interconnexions au sein de la ligne de production devient critique pour les technologies sub 90nm [FISHER 2005]. En particulier, afin d'améliorer et de garantir les performances des interconnexions, il devient primordial :

- De définir l'origine des sources de variations des mesures électriques et physiques caractérisant les interconnexions afin de les réduire,
- D'ajuster correctement les spécifications associées à ces mesures en se basant sur les modèles statistiques établis.

I.2- Objectifs de la modélisation de la variabilité induite par les étapes de fabrication des interconnexions – Amélioration de la variance de la conductivité des interconnexions

L'objectif principal de ce chapitre est de caractériser la nature et l'origine des sources de variations des mesures physiques et électriques afin de proposer des actions de réduction de ces variabilités. La Figure 103 présente la répartition de chacune des mesures normalisées par rapport aux spécifications.

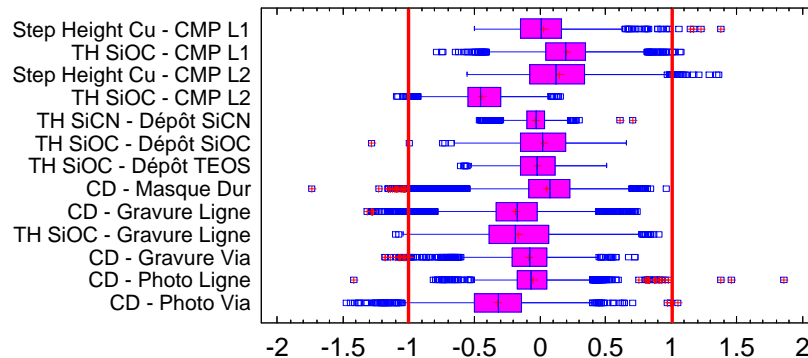


Figure 103. Répartitions des mesures physiques effectuées lors module "Métal 2".
Les valeurs sont normalisées par rapport aux spécifications définies par les ingénieurs "device".

La figure ci-dessus indique une grande variabilité des mesures physiques par rapport aux spécifications. Cette variabilité importante nous permet, comme lors des chapitres précédents, d'envisager une modélisation des interactions entre les mesures basées sur les mesures de production. Ce chapitre sera découpé en 3 parties :

- Modélisation des interactions entre les mesures physiques effectuées lors de l'élaboration des interconnexions pour le niveau de métal 2 et les mesures électriques caractérisant les structures établies,
- Modélisation entre les paramètres des équipements collectés durant les procédés de fabrication et les mesures physiques associées.
- Réduction de la variabilité des mesures de résistance des lignes de métal basée sur les analyses de corrélation entre les mesures physiques & électriques et les paramètres des équipements.

II- Modélisation des interactions entre les opérations de fabrication des interconnexions et analyse de la source de variance des mesures électriques du module métal 2

Cette partie vise à modéliser les interactions entre chacune des opérations de fabrication et leur impact sur les mesures électriques du module métal 2. Toujours par souci de clarté du manuscrit, seuls les résultats statistiques validés physiquement sont présentés dans ce paragraphe. Le détail des analyses est reporté en annexe.

II.1- Modélisation statistique des relations entre les mesures physiques

Le Tableau 26 présente les résultats des analyses statistiques multivariées de corrélation entre les mesures physiques du module interconnexion métal 2 :

- L'épaisseur de SiOC après polissage mécano-chimique dépend principalement de l'épaisseur de diélectrique SiOC déposé. Le polissage du SiOC étant en temps fixe, plus l'épaisseur déposée est grande plus celle mesurée après polissage est importante,
- La variabilité des dimensions des motifs après gravure ligne et via provient respectivement des opérations de gravure du masque dur et de photolithographie via définissant les zones à graver. Ces analyses quantifient la part de variabilité des motifs après gravure due à la variabilité des motifs avant gravure et à la gravure elle-même :
 - o 63% de la variance du paramètre "CD - Gravure ligne" provient de la variabilité des étapes antérieures. 100% - 63% = 37% peut être alors attribuée à la gravure ligne,
 - o Environ 15 % de la variance du paramètre "CD - Gravure via" est due aux opérations précédentes et 85% à l'étape de gravure.

Entrée / Sortie	Indicateurs de corrélation		TH SiOC - CMP L1	Step Height Cu - CMP L1	TH SiOC - Dépôt SiOC	TH SiOC - Dépôt TEOS	CD - Photo Ligne	CD - Masque Dur	CD - Photo Via	TH SiOC - Gravure Ligne	TH SiOC - CMP L2
	R ²	Q ²									
TH SiOC - Dépôt SiOC											
TH SiOC - Dépôt TEOS	96 %	96 %	-	-	96 % (+)						
CD - Photo Ligne											
CD - Masque Dur	12 %	10 %	-	-	-	-	12 % (+)				
CD - Photo Via											
CD - Gravure Via	15 %	14 %	-	-	-	-	-	-	15 % (+)		
CD - Gravure Ligne	63 %	60 %	-	-	-	-	7 % (+)	56 % (+)	-		
TH SiOC - Gravure Ligne	51 %	48 %	-	-	51 % (+)		-	-	-		
TH SiOC - CMP L2	30 %	28 %			20 % (+)					10 % (+)	
Step Height Cu - CMP L2	33 %	33 %	-	-	-	-	-	-	-	-	33 % (-)
	Pas de corrélation										
	Mesure réalisée à posteriori										

Tableau 26. Table de corrélation entre les mesures physiques du module métal 2.

La validation physique complète des liens entre les opérations de fabrication du module d'interconnexion métal 2 est disponible en annexe 13.

II.2- Présentation des relations statistiques modélisant l'impact de la variabilité des procédés sur les caractéristiques électriques des interconnexions

Les mesures caractérisant les performances électriques des interconnexions regroupent principalement des mesures de résistance des lignes et des vias élaborés. Ce paragraphe s'intéresse à la modélisation des variations de ces mesures électriques en fonction des mesures physiques effectuées lors de l'élaboration des interconnexions métal 2 (Tableau 27):

Entrée Sortie	Indicateurs de corrélations		TH SiCN - Dépôt SiCN	TH SiOC - Dépôt SiOC	CD - Masque Dur	CD - Gravure Via	CD - Gravure Ligne	TH SiOC - Gravure Ligne	TH SiOC - CMP L2	Step Height Cu - CMP L2
	R ²	Q ²								
RLM2SLD	65 %	64 %	-	-	-	-	-	65 %	-	-
RSM220D	69 %	68 %	-	-	-	-	-	45 %	24 %	-
CDM220D	36 %	34 %	-	-	-	-	-	24 %	12 %	-
CIMD1	64 %	63 %	-	24 %	-	-	-	40 %	-	-
TIMD1	65 %	64 %	-	24 %	-	-	-	41 %	-	-
RV1HD9K	31 %	30 %	-	-	-	31 %	-	-	-	-
RV1LD2K	32 %	30 %	-	-	-	32 %	-	-	-	-
RV1VLIUSIT	35 %	33 %	-	-	-	35 %	-	-	-	-
RV1HDYEM1M	35 %	33 %	-	-	-	35 %	-	-	-	-

Tableau 27. Corrélation entre les variations des mesures électriques et physiques du module métal 2.

- La variance des résistances des lignes de cuivre (RLM2SLD et RSM200D) est corrélée avec les opérations de gravure ligne et de polissage mécanico-chimique. En effet, ces deux opérations influencent les dimensions des lignes de métal :
 - o La gravure ligne impacte la hauteur de SiOC restante au fond des lignes. Plus cette hauteur est grande, plus la hauteur de cuivre est faible (Figure 102),
 - o Le polissage du cuivre joue sur la hauteur des lignes de métal. Plus le polissage est important, plus la hauteur de cuivre dans les lignes est faible.
- Seulement 30% environ de la variabilité des résistances de via (appelées RV1xxxx) est expliquée par la dimension physique des structures. Cette variabilité est naturellement corrélée à la dimension des vias. Nous attribuerons le pourcentage de variabilité non expliquée à des variations non mesurées sur les plaques de production tels que l'épaisseur de barrière TaN déposée, la qualité de la gravure en fond de via (un problème d'ouverture du via entraîne une augmentation de sa résistance - Figure 104) ou encore la qualité du remplissage des vias par le cuivre.

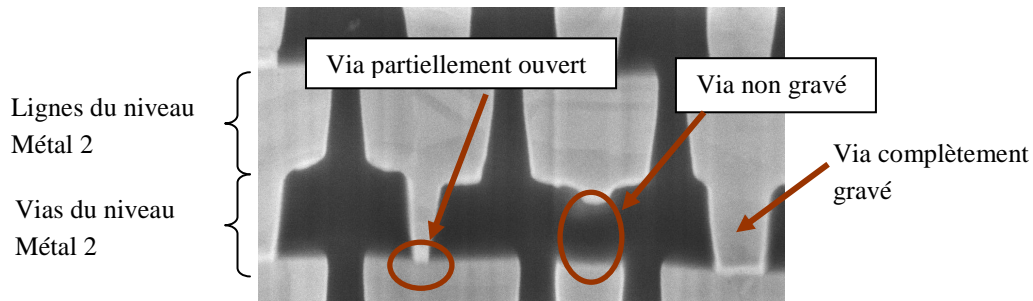


Figure 104. Coupe TEM du niveau d'interconnexion Métal 2.

- La mesure de capacité (CIMD1) entre les lignes des niveaux d'interconnexions 1 et 2 dépend naturellement de l'épaisseur de diélectrique finale séparant les deux lignes de métal (équivalente au paramètre "TH SiOC - Gravure Ligne"). Plus cette épaisseur est importante, plus la capacité est faible.

La validation physique complète de l'impact des opérations de fabrication du module d'interconnexion métal 2 sur les mesures électriques paramétriques est disponible en annexe 13.

Dans les paragraphes précédents nous avons présenté les résultats des modélisations entre les mesures physiques et électriques du module métal 2. Ces analyses ont notamment permis de comprendre l'origine des variations des résistances des lignes de métal. Le paragraphe suivant s'intéresse plus particulièrement à la modélisation de la variabilité des mesures physiques en fonction des paramètres des équipements collectés par le système FDC.

III- Modélisation des étapes élémentaires employées pour la réalisation des interconnexions

Pour le module métal 2, on distingue plusieurs types de procédés contrôlés par au moins une mesure physique :

- Les dépôts PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) de SiCN et SiOC,
- La photolithographie des lignes et des via,
- La gravure du masque dur en TiN,
- La gravure des lignes et des via,
- Le polissage mécano-chimique du cuivre en fin de module.

Remarque : comme pour les analyses de modélisation des modules STI et grille, les équipements de photolithographie n'étaient pas connectés au système FDC lors des analyses.

III.1- Modélisation du comportement du procédé de dépôt SiCN

Le dépôt SiCN est utilisé comme barrière de diffusion lors de l'élaboration des interconnexions. Cette fine couche (environ 460Å) a plusieurs fonctions :

- Son principal rôle est, comme énoncé ci dessus, de constituer une barrière de diffusion du cuivre,
- Cette couche sert aussi de couche d'arrêt lors de la gravure des lignes. Elle permet de ne pas graver le cuivre en fond de ligne,
- Finalement, le dépôt SiCN est utilisé comme couche de protection pour éviter que le cuivre s'oxyde lors du passage à l'atmosphère entre la fin de la gravure via et la gravure ligne.

III.1.a- Description de l'équipement de PECVD et du procédé de dépôt SiCN

Pour la technologie 90nm, le dépôt SiCN est réalisé sur des équipements de type AMAT-Producer. Dans un seul corps de chambre PECVD, il y a 2 stations de dépôt indépendantes –ou side– qui peuvent donc traiter simultanément 2 plaques. Les deux stations partagent les mêmes arrivées de gaz et le même contrôle de pression mais chaque station possède son propre générateur RF, son propre circuit de chauffage et son propre système de réglage du spacing¹⁷.

La Figure 105 propose une représentation schématique d'un équipement de type AMAT - Producer. Nous noterons que cet équipement possède 3 chambres destinées aux 3 procédés de dépôt utilisés lors de l'élaboration des interconnexions (SiCN, SiOC et TEOS).

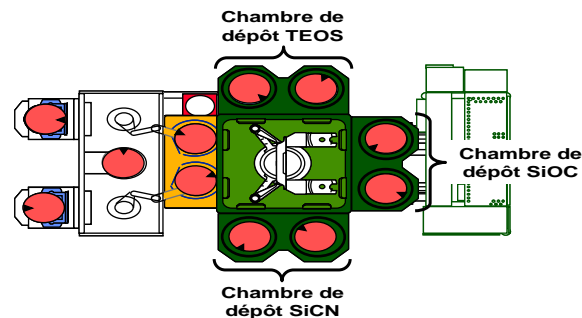
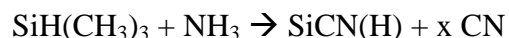


Figure 105. Représentation d'un équipement de type AMAT-Producer.

Les éléments nécessaires pour le dépôt PECVD sont :

- Des gaz précurseurs. Dans le cas du dépôt SiCN, le gaz principal est le Tri Méthyl Silane (TMS). La réaction de formation du composé SiCN s'écrit :



L'hélium est utilisé en tant que gaz neutre porteur.

¹⁷ Espace physique entre les 2 électrodes de la chambre.

- Une basse pression (quelques Torr),
- Une température modérée (entre 300°C et 500°C) permet d'optimiser la qualité des films déposés,
- Une puissance électrique radio-fréquence (basse fréquence 450 KHz ou/et haute fréquence 13.56 MHz).

Les précurseurs introduits dans un réacteur à basse pression se mélangent et diffusent à la surface de la plaque. Les espèces chimiques sont excitées avec une puissance électrique pour augmenter leur réactivité (formation de radicaux). Elles réagissent à la surface de la plaque pour former le produit de réaction sous forme solide, le film et des produits de réactions volatils évacués par pompage.

Le domaine de variation des paramètres FDC collectés lors des principales étapes du procédé de dépôt SiCN est présenté en Annexe 14 .

III.1.b- Résultats des modélisations

Dans la gamme de variabilité des paramètres de l'équipement de dépôt SiCN, aucune corrélation statistique permettant d'expliquer les variations d'épaisseur de SiCN n'est clairement établie. L'ensemble des paramètres FDC collectés ne permet pas de prédire des variations du procédé de dépôt.

Les paramètres collectés par le système FDC sont essentiellement des paramètres régulés par la machine (Annexe 14) qui varient peu d'une plaque à l'autre (par exemple, moins d'1°C de différence est constaté sur la température des plaques étudiées). Nous admettrons les hypothèses suivantes pour expliquer la faible qualité des modélisations :

- Les paramètres régulés par la machine ne quantifient pas réellement la grandeur mesurée,
- D'autres paramètres sont nécessaires pour caractériser complètement le plasma (composition, densité, ...) et la réaction de dépôt (température réelle de la plaque, pression au niveau de la plaque).

Dans le paragraphe suivant, nous définirons si les paramètres collectés pendant le dépôt SiOC sont suffisants pour modéliser les variations d'épaisseur de SiOC mesurées.

III.2- Modélisation du comportement du procédé de dépôt SiOC

L'isolation des interconnexions, en technologie 90nm, est assurée par une couche de diélectrique SiOC ($\epsilon=2,9$). Le dépôt de cette couche est effectué dans le même type d'équipement que le dépôt SiCN.

III.2.a- Procédé de dépôt SiOC

La recette de dépôt de la couche de SiOC contient un plasma d'O₂ avant le dépôt du SiOC qui doit permettre une meilleure adhérence de la couche de diélectrique sur le SiCN. Elle contient également un plasma d'He après le dépôt afin d'augmenter l'adhérence avec la couche suivante.

La principale différence entre le dépôt SiCN et le dépôt SiOC et la nature du gaz réagissant avec le TMS. Dans le cas de la déposition de la couche du diélectrique, on utilise un mélange TMS-O₂. L'équation de la réaction est décrite ci dessous :



L'ensemble des paramètres équipements collectés par le système FDC ainsi que leur gamme de variation lors du procédé de dépôt SiOC sont décrits en Annexe 15.

IV.2.b- Résultats des modélisations

Les résultats des analyses multivariées montrent une très faible corrélation entre les données FDC collectées durant le procédé et les variations d'épaisseur de SiOC. Les conclusions de ces analyses convergent avec celles proposées lors de l'étude du dépôt SiCN. Dans la gamme de variabilité des paramètres FDC, il n'est pas possible d'expliquer statistiquement la valeur d'épaisseur de SiOC déposée. Les modélisations des dépôts SiOC et SiCN démontrent que l'ensemble des paramètres FDC collectés n'est pas représentatif des fluctuations des procédés.

III.3- Modélisation du comportement du procédé de gravure du masque dur en TiN

Pour les technologies sub-90nm, l'utilisation d'un masque dur en TiN est nécessaire car la consommation en résine devient trop importante lors de la gravure des lignes. L'étape de gravure du masque dur en TiN définit les dimensions des lignes de métal. Dans la partie II.1 de ce chapitre, les analyses statistiques ont notamment montrées que 56% des variations des dimensions des lignes proviennent de la variabilité des dimensions du masque dur en TiN. Dans les paragraphes suivants, nous nous proposons de caractériser la variabilité des dimensions du masque dur après gravure à l'aide des paramètres équipements en sachant que seulement 12% de cette variabilité provient d'étapes antérieures.

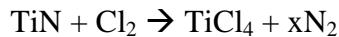
III.3.a- Présentation du procédé de gravure métal TiN

Sur le site de Crolles 2, la gravure de la couche de TiN s'effectue sur des équipements de type LAM TCP (identique aux équipements utilisés pour la gravure du polysilicium).

La recette de gravure métal est principalement composée de 5 étapes :

- La gravure principale de la couche antiréfléctive – BARC (BARC ME). Une chimie à base d'O₂ et de Cl₂ est utilisée. Le système de détection de fin d'attaque "arrête" le procédé lorsque la gravure débouche sur la couche de TiN.

- La sur-gravure du BARC (BARC OE) enlève le BARC sur toute la plaque au niveau des zones non protégées par la résine. La chimie utilisée est identique à celle de la gravure principale.
- L'étape de "trimming" permet d'ajuster les dimensions de la ligne de métal à graver en jouant sur la gravure isotrope du BARC. La chimie utilisée est identique aux 2 étapes précédentes.
- La gravure principale du TiN (TiN ME). La chimie utilisée comporte les gaz Cl₂ et BCl₃. La réaction entre le TiN et le chlore forme des composés volatils extraits par pompage.



Le système de détection de fin d'attaque arrête le procédé lorsque la gravure débouche sur la couche de TEOS.

- La sur gravure du TiN (TiN OE) permettant de graver complètement le TiN sur toute la plaque. La chimie utilisée est identique à celle de la gravure principale.

Les variations de l'ensemble des paramètres FDC collectés lors de la gravure du masque dur de TiN sont présentées en Annexe 16.

III.3.b- Résultats des modélisations

Les résultats des modélisations montrent un faible degré d'explication de la variabilité des dimensions des motifs après gravure du masque dur :

- 24% des variations plaques à plaques de la mesure physique "CD - Masque dur" sont principalement expliquées par la variabilité du temps de sur-gravure de la couche anti-réfléctive (ProcessTime). La dimension des motifs gravés augmente logiquement avec le temps de sur-gravure.
- Moins de 5% des variations de dispersion au sein de la plaque sont expliqués à l'aide des paramètres équipements.

Cette analyse démontre que, pour la gravure métal, les paramètres de l'équipement ne permettent pas de prédire l'ensemble des variations des dimensions finales des motifs gravés. La variabilité naturelle de cette mesure ne peut s'expliquer à l'aide des paramètres FDC collectés actuellement. Cette conclusion rejoint celles déjà énoncées dans les chapitres 3 et 4, à savoir que l'ensemble des paramètres collectés par les équipements de gravure ne sont pas suffisants pour caractériser complètement le plasma (composition, densité, ...) ainsi que les phénomènes de gravure chimique et physique.

III.4- Modélisation du comportement du procédé de gravure des via

Le via réalise la connexion entre 2 niveau de métal. La principale différence entre les technologies utilisant du cuivre et celles qui ne l'utilisent pas, est que dans le premier cas, le via est beaucoup plus profond car directement gravé dans l'oxyde. Les analyses présentées dans la partie II.1 de ce chapitre ont démontrées que 85% de la variabilité des dimensions des motifs après la gravure des via peuvent être attribuées au procédé de gravure lui-même. Dans ce paragraphe, nous proposons de comprendre ces variations en le modélisant à l'aide des paramètres équipement.

III.4.a- Procédé de gravure des vias

Sur le site de crolles 2, la gravure des via est effectuée sur des équipements LAM Versys identiques à ceux utilisés lors de la gravure de l'offset et des espaceurs. Par conséquent nous ne reviendrons pas sur la description de ce type de machine.

La gravure des via se décompose en trois étapes principales :

- La gravure de la couche antiréfléctive – BARC. Cette couche, déposée en photolithographie afin d'avoir une meilleure définition des motifs, est gravée à partir d'une chimie $CF_4 / O_2 / Ar$.
 - o L' O_2 permet de graver la résine,
 - o Le CF_4 permet d'introduire des espèces carbonées et à passiver les flancs. Le résultat de cette addition limite l'isotropie de gravure.
- La gravure principale de l'oxyde en temps fixe. Basée sur une chimie CH_2F_2 / Ar :
 - o Le CH_2F_2 apporte l'espèce gravante,
 - o L' Ar permet de garder des profils relativement droit par pulvérisation.
- La sur-gravure de l'oxyde à partir d'une chimie Ar / C_4F_6 assure l'ouverture des via sur toute la plaque.

L'ensemble des paramètres de l'équipement collectés lors de la gravure des via ainsi que la plage de variation associée à chacun de ces paramètres sont présentés en Annexe 17.

III.4.b- Résultats des modélisations

Les précédentes analyses de corrélation montrent que 15% de la variabilité du paramètre "CD - Gravure via" provient de l'étape de photolithographie précédente. L'analyse statistique des paramètres équipements indique que respectivement 8 et 5% de la variabilité de la valeur moyenne et de la dispersion intra plaque du paramètre physique est corrélée à des variations de paramètres équipement. Le faible pourcentage de corrélation entre les paramètres FDC et la dimension des vias indique que pour la gamme de variation étudiée, il n'est pas possible d'expliquer un changement de profil de gravure au sein de la plaque.

Cette nouvelle conclusion est similaire à celles obtenues lors des analyses de modélisation entre les paramètres FDC des équipements de gravure et les mesures physiques effectuées à posteriori.

III.5- Modélisation du comportement du procédé de gravure des lignes

Les lignes de métal assurent la connexion entre les différents dispositifs. Les analyses statistiques multivariées présentées dans le paragraphe V.2- montrent que près de 60% des variations des dimensions des lignes après gravure ligne sont corrélées à des fluctuations d'étapes antérieures. Dans ce paragraphe, nous chercherons à comprendre d'où proviennent les 40% de variabilité non expliqués.

III.5.a- Procédé de gravure des lignes

Pour la technologie 90nm, la gravure des lignes est réalisée sur des équipements LAM Versys identiques à ceux utilisés lors de la gravure de l'offset et des espaceurs. Par conséquent nous ne reviendrons pas sur la description de ce type d'équipement.

La gravure des lignes se décompose en quatre étapes principales :

- La gravure de la résine à partir d'une chimie O_2 / CO ,
- La gravure principale de l'oxyde. La chimie utilisée est composée des gaz Ar et C_4F_8 :
 - o Le C_4F_8 permet de graver la couche de SiOC et de passiver les flancs pour s'assurer d'une gravure anisotrope,
 - o L'Ar permet de garder des profils relativement droit par pulvérisation.
- Le retrait de la résine en fond de via basée sur une chimie O_2 / CO ,
- La gravure du SiCN et l'ouverture complète des via. Le gaz utilisé est le CF_4 .

Les paramètres de l'équipement collectés lors de la gravure des lignes ainsi que leur domaine de variation sont décrits en Annexe 18.

III.5.b- Résultats des modélisations

La modélisation des interactions entre les étapes de fabrication des interconnexions a été clairement établi dans les paragraphes précédents. Les résultats ont notamment montrés que plus de la moitié de la variabilité des deux mesures effectuées après gravure des lignes pouvait être attribuée à des étapes antérieures : la largeur et la profondeur des lignes de métal étant respectivement corrélées aux étapes de gravure du masque dur TiN et au dépôt du diélectrique SiOC.

L'analyse des paramètres de l'équipement collectés lors de la gravure des lignes ne permet pas de mieux expliquer la variabilité de ces deux paramètres. Ainsi, les paramètres FDC collectés lors des trois gravures du module métal 2 sont très peu représentatifs des conditions des procédés

de fabrication. Ces paramètres permettent de comprendre de fortes dérives des équipements [ALEGRET 2003] mais pas d'expliquer leur variabilité naturelle. L'optimisation du plan de contrôle FDC pour les procédés correspondants n'est par conséquent pas possible.

III.6- Modélisation du comportement du procédé de polissage mécanico-chimique

La dernière étape d'un niveau d'interconnexion consiste à polir mécanico-chimiquement une partie du cuivre précédemment déposé. Dans ce paragraphe, nous nous proposons de caractériser la variabilité liée à cette étape.

III.6.a- Procédé de polissage du cuivre

L'équipement de polissage du cuivre est du même type que celui utilisé pour le polissage de l'oxyde STI. Le procédé est effectué sur 3 plateaux différents :

- Le plateau 1 prend en charge l'aplanissement global de la couche de cuivre déposée par électrodéposition (ECD). La plus grosse partie du cuivre est enlevée lors de cette étape. La détection de fin de procédé est basée sur le principe des courants de Foucault : une bobine est placée dans le plateau. Des champs magnétiques variables induisent des courants de Foucault dans la couche conductrice supérieure de la plaque. La détection s'appuie sur la mesure de ces intensités. Ces dernières dépendent de l'épaisseur de cuivre restante en surface ; Il est ainsi possible de connaître l'épaisseur de cuivre restant à tout instant durant le polissage.
- Le plateau permet d'éliminer complètement le cuivre pour faire apparaître la barrière de diffusion (Ta/TaN). Ce procédé est réalisé dans les mêmes conditions que le plateau, à la différence que l'on diminue la pression de polissage pour éviter une surconsommation de cuivre dans les tranchées. La détection de fin de polissage est assurée un système optique par l'In Situ Rate Monitoring (ISRM). C'est un système de détection permettant de suivre l'évolution du cuivre restant en regardant l'intensité réfléchie par la surface du wafer lorsque celle est illuminée à une source LASER ($\lambda = 670 \text{ nm}$). La réflectivité totale reçue par le capteur dépend de la topographie et des épaisseurs des couches ainsi que de leur composition.
- Le plateau 3 polit la barrière de diffusion à l'aide d'un slurry peu sélectif pour conserver la planéité du wafer (non uniformité). L'objectif est de retirer la totalité de la barrière de diffusion en Ta/TaN, ainsi qu'une faible épaisseur de diélectriques pouvant contenir des traces de Cu ou de TaN. Cette étape du procédé est effectuée en temps fixe.

Les variations des paramètres FDC collectés lors du polissage mécanico-chimique du niveau de métal 2 sont présentées en Annexe 19.

III.6.b- Résultats des modélisations

Les modélisations entre les mesures physiques du module métal 2 ont précédemment démontré que respectivement 30% et 33% des variations des mesures d'épaisseur de SiOC et de dishing du Cu sont corrélées à la variabilité d'étapes antérieures. L'analyse multivariée des variations de valeur moyenne de ces deux mesures physiques montre que 40% et 68 % de la variabilité des mesures du SiOC et du cuivre peut être expliquée à l'aide des paramètres équipements.

Les principaux paramètres équipement expliquant les variations des mesures physiques sont l'usure et la nature entre les consommables :

- L'usure du disque de diamant avivant le plateau (paramètre FDC : PadCond3Usage) influe sur la dispersion du dishing du cuivre plaque à plaque ainsi que lot à lot (paramètre : Step Height Cu – CMP L2): la hauteur de marche entre le bord et le centre de la ligne est plus important en début de lot et par conséquent lorsque le disque est moins utilisé. La valeur moyenne du dishing est également plus grande lorsque la durée de vie du disque est faible (Figure 106).

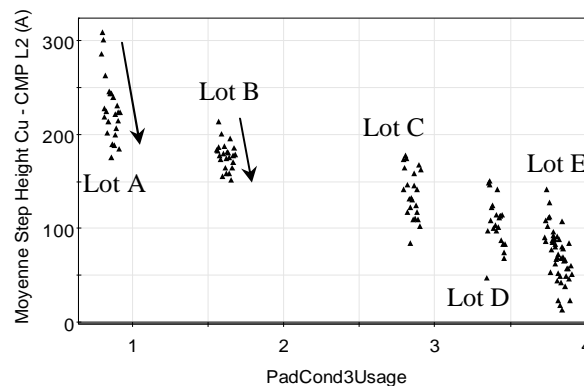


Figure 106. Influence de l'usure du disque de diamant sur le dishing du cuivre post CMP.

Cette relation se retrouve également sur la mesure de l'épaisseur de diélectrique SiOC (non représenté ici). Elle montre l'influence de l'usure du disque de diamant qui avive le plateau entre chaque lot. En fin de vie, l'efficacité du disque est moindre, le polissage du Cu et du SiOC est moins rapide et par conséquent le dishing est moins important.

- La Figure 107 montre l'impact de l'usure des têtes de polissage (Paramètre FDC : Head x Usage avec x numéro de la tête de polissage) sur les dispersions inter-plaque et intra-plaque de la mesure du dishing du cuivre. Cette variabilité augmente avec l'usure des têtes. L'effet tête de polissage contribue également à la variabilité plaque à plaque au sein d'un lot.

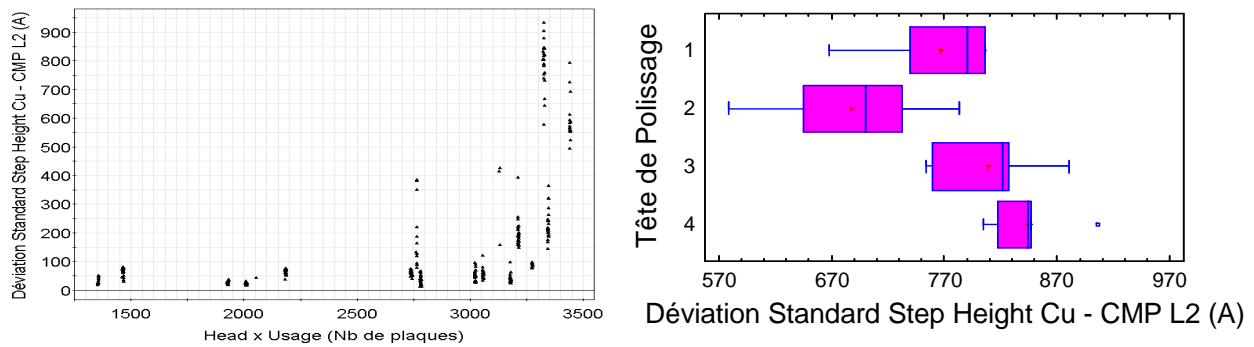


Figure 107. Corrélation entre le dishing du cuivre et les caractéristiques des têtes de polissage.

L'ensemble des analyses effectuées a permis de comprendre environ 70% de la variabilité des deux mesures effectuées après le polissage. Les modélisations multivariées entre ces mesures et les paramètres équipements ont notamment quantifié l'impact de la durée de vie des consommables sur l'épaisseur de SiOC et le dishing.

III.6.c- Optimisation du plan de contrôle FDC

La qualité des modèles obtenus entre les mesures physiques et les paramètres FDC rend l'optimisation du plan de contrôle FDC possible. Ainsi, en fonction des limites appliquées lors du contrôle SPC et les modèles statistiques élaborés, des limites FDC peuvent être proposées (Tableau 28).

	Contrôle SPC		Contrôle FDC		
	Limite de contrôle basse (Å)	Limite de contrôle haute (Å)	Paramètre FDC corrélé	Limites de contrôle basse proposée	Limites de contrôle haute proposée
Moyenne – Step Height Cu - CMP L2	0	1000	PadCond3 Usage		6
Stdev – Step Height - Cu	10	300	Head x Usage		3300
Moyenne – TH SiOC - CMP L2	5880	6620	PadCond3 Usage		6

Tableau 28. Optimisation du plan de contrôle FDC du procédé de polissage métal 2.

L'optimisation du plan de contrôle FDC du procédé de polissage métal 2 permet ainsi d'anticiper le changement des consommables. Dans le paragraphe suivant, nous montrerons les possibilités de réduction de la variabilité due à la durée de vie des consommables.

IV- Apports des analyses de modélisation

La compréhension de la variabilité des mesures électriques par corrélation avec les mesures physique et les paramètres FDC a notamment souligné l'influence du procédé de polissage du cuivre ; La variance de ce procédé étant principalement corrélée au procédé de dépôt du diélectrique SiOC et à la durée de vie des consommables. Dans ce paragraphe, plusieurs

actions de réduction de la variance des mesures électriques sont proposées et la cohérence entre les limites de spécification des mesures électriques et physique est discutée.

IV.1- Proposition de réduction de la variabilité des mesures de résistances des lignes de métal

Les analyses de régression précédente ont montré l'influence de la variabilité de l'épaisseur de SiOC après la gravure ligne et le polissage mécanico-chimique sur la variabilité des mesures des résistances des lignes de métal. Les corrélations établies étaient de l'ordre de 70%. La figure ci-dessous présente la décomposition de variance de ces deux mesures physiques ainsi que des mesures électriques corrélées.

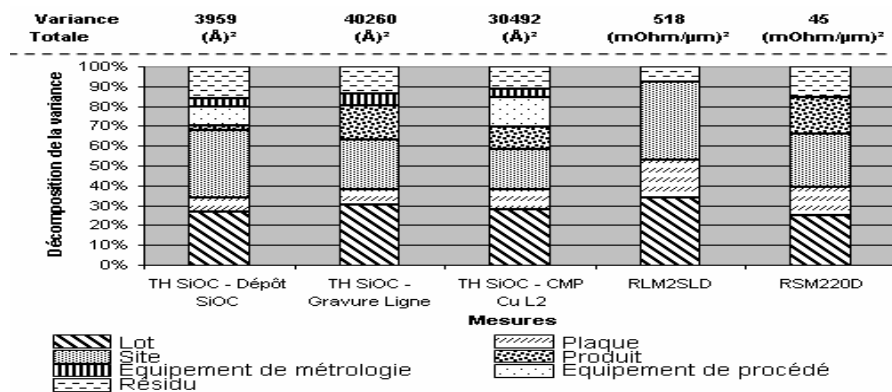


Figure 108. Décomposition de variance des mesures physiques & électriques du module métal 2.

Cette décomposition met en évidence un fort effet lot à lot sur chacune des mesures physiques et électriques. L'amélioration de la dispersion des mesures électriques nécessite une réduction de la variabilité de l'épaisseur de SiOC après polissage Afin de réduire cette dispersion lot à lot, et en fonction des modélisations obtenues en les mesures physiques (Tableau 26), plusieurs solutions de boucles de régulation sont proposées (Figure 109) :

- 1- Une boucle de régulation Feed Forward-FF entre les étapes de dépôt SiOC et de polissage. L'objectif de cette boucle étant de réduire la dispersion engendrée en dépôt.
- 2- Une boucle de régulation Feed Back-FB au niveau de la gravure ligne. Le Tableau 26 présente l'influence de l'épaisseur de SiOC gravée sur les mesures physiques post polissage. Une telle boucle de régulation permet de réduire la variance due à la gravure ligne.
- 3- Une boucle de régulation Feed Back-FB au niveau de l'étape de polissage mécanico-chimique afin de corriger les variations de ce procédé de fabrication.
- 4- Une boucle de régulation Feed Forward-FF entre les étapes de gravure des lignes et le polissage afin de modifier les conditions du procédé de polissage en fonction des mesures effectuées après la gravure des lignes.

5- Une boucle de régulation Feed Forward-FF au niveau de l'opération de polissage réduisant l'effet systématique des consommables sur les performances de ce procédé.

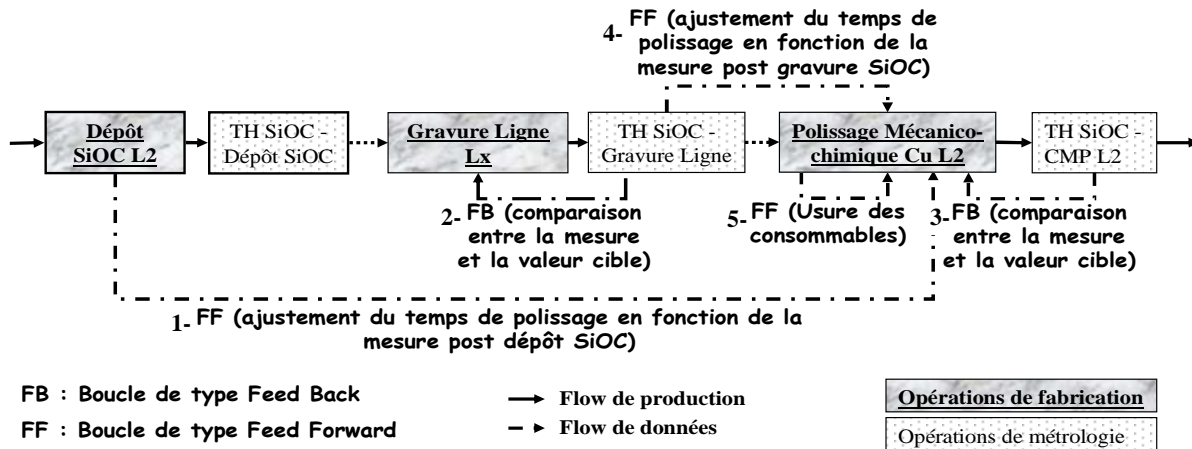


Figure 109. Proposition de boucle de régulation pour la réduction de la variabilité des résistances électriques des lignes de métal.

La réduction de la variance du procédé de polissage mécano-chimique peut donc être effectuée en implémentant plusieurs boucles de régulation. La première phase de ce projet consiste à réduire la variance engendrée uniquement au niveau du polissage (solutions ci-dessus 3 et 5) afin de ne pas prendre en compte la variabilité des procédés de gravure et de dépôt SiOC. Les paramètres de la boucle de régulation sont donc :

- L'épaisseur enlevée par le polissage : $(\text{TH SiOC} - \text{Dépôt SiOC}) - (\text{TH SiOC} - \text{CMP Cu Lx})$,
- L'usure des consommables de l'équipement de polissage,

Une seconde phase permettra de prendre en compte l'influence du dépôt SiOC et de la gravure ligne sur le procédé de polissage (solutions 1, 2 et 4).

Description du modèle de régulation

Les équipements de CMP cuivre sont utilisés indifféremment pour le polissage des niveaux de métal 1 à 5. Les niveaux de métal 2 à 5 présentent exactement le même empilement de couches ; l'unique différence étant la densité des lignes de cuivre entre les niveaux de métal. Le niveau "métal 1" présente quelques différences en terme d'épaisseur de SiOC notamment (2750\AA au lieu de 6800\AA pour les autres lignes). Pour fonctionner, la boucle de régulation nécessite un maximum de données afin d'être le plus représentatif possible des variations du procédé. L'implémentation de la boucle de régulation au niveau du polissage du cuivre prendra par conséquent en compte l'ensemble des lignes 1 à 5. Le modèle de régulation comprendra l'effet ligne pour désensibiliser le modèle par rapport à cet effet.

Présentation du modèle de régulation simplifié

Le modèle de régulation doit, en prenant en compte l'épaisseur de SiOC déposée :

- Réduire l'erreur systématique due à l'usure des consommables,
- Diminuer l'erreur due à la différence entre la valeur mesurée et la valeur prédite par le modèle (erreur non attribuable à l'usure des consommables).

Le scénario de fonctionnement de la boucle de régulation est décrit ci-dessous :

Premier lot après chaque changement de disque de diamant :

Chaque disque de diamant étant différent, le premier temps t_1 de polissage après changement des disques de diamant est fixe (temps utilisé en production avant la mise en place de la boucle de régulation = 77s). On définit la vitesse de polissage prédite pour le lot 1 :

$$(RR_{\text{prédit}})_{\text{Lot 1}} = \frac{(TH \text{ SiOC} - \text{Dépôt SiOC Lx})_1 - (Cible TH \text{ SiOC} - CMP \text{ Cu Lx})}{t_1}$$

Avec : $Cible TH \text{ SiOC} - CMP \text{ Cu Lx} = 6800 \text{ \AA}$ pour les niveaux de métal 2 à 5 et 2750 \AA pour le niveau métal 1.

Après polissage du lot 1, la vitesse de polissage effective peut être calculée :

$$(RR_{\text{mesuré}})_{\text{Lot 1}} = \frac{(TH \text{ SiOC} - \text{Dépôt SiOC Lx})_1 - (TH \text{ SiOC} - CMP \text{ Cu Lx})}{t_1}$$

On en déduit une erreur entre la valeur prédite et la valeur réalisée (Cette erreur est principalement attribuée aux effets de l'usure du disque de diamant sur la vitesse de polissage) :

$$(\text{Erreur})_{\text{Lot 1}} = (RR_{\text{prédit}})_{\text{Lot 1}} - (RR_{\text{mesuré}})_{\text{Lot 1}} = \varepsilon_1$$

La valeur prédite pour le second lot tient compte de ε_1 , anticipe l'effet de l'usure du disque de diamant et se trouve pondérée par des coefficients "effet ligne" et "densité de structure" qui permettent de prendre en compte dans le modèle la structure des interconnexions :

$$(RR_{\text{prédit}})_{\text{Lot 2}} = (RR_{\text{prédit}})_{\text{Lot 1}} + \lambda \cdot \varepsilon_1 + a_2 \cdot \text{PadCondUsage} + \text{Effet ligne} + \text{Effet densité de structure}$$

Avec a_2 : coefficient de corrélation moyen entre la vitesse de polissage et l'usure des disques

On en déduit le temps à appliquer pour le lot 2 en fonction de l'épaisseur à enlever (= 550 \AA) :

$$t_2 = \frac{(Cible TH \text{ SiOC} - \text{Dépôt SiOC Lx})_2 - (Cible TH \text{ SiOC} - CMP \text{ Cu Lx})}{(RR_{\text{prédit}})_{\text{Lot 2}}}$$

Après polissage du lot 2, on en déduit une nouvelle erreur qui permettra de calculer la nouvelle prédiction pour le lot suivant :

$$(\text{Erreur})_{\text{Lot 2}} = (RR_{\text{prédit}})_{\text{Lot 2}} - (RR_{\text{mesuré}})_{\text{Lot 2}} = \varepsilon_2$$

Optimisation du modèle de régulation – Prise en compte de la nature des disques de diamant

Les disques de diamant n’étant pas identiques, l’influence de leur usure sur le procédé n’est pas la même. L’épaisseur de matériau poli en fonction de l’usure des disques de diamant ne diminue pas à la même vitesse pour chaque disque. Le modèle proposé dans ce paragraphe ajuste le coefficient a_1 (considéré comme fixe dans le modèle précédent). A chaque mesure le coefficient a est recalculé avec les nouvelles valeurs. Le nouveau coefficient calculé a_2 pondère le précédent de β . Le nouveau coefficient du modèle devient alors :

$$a_3 = \beta a_2 + (1-\beta).a_2 \text{ calculé}$$

La valeur prédite pour le lot 3 s’exprime alors :

$$(RR_{\text{prédit}})_{\text{Lot 3}} = (RR_{\text{prédit}})_{\text{Lot 2}} + \lambda.\varepsilon_2 + a_3.PadCondUsage + \text{Effet ligne} + \text{Effet densité de structure}$$

Ainsi, le modèle est ajusté après chaque nouveau lot. La Figure 110 montre que l’implémentation d’une telle boucle de régulation diminue de 30% la variabilité du procédé de polissage du cuivre.

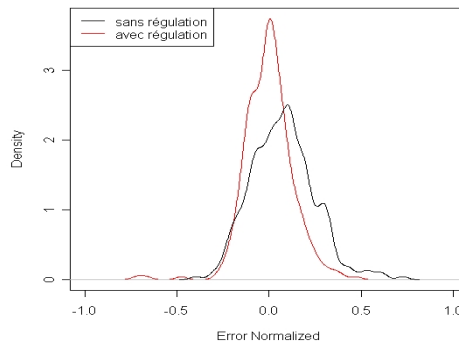


Figure 110. Distribution de l’épaisseur enlevée avec et sans boucle de régulation CMP Cu.

IV.2- Vérification de la cohérence entre les spécifications des mesures électriques et physiques du module d’interconnexion métal 2

Les analyses de modélisation ont donc quantifié les corrélations entre chacune de ces mesures électriques et physiques. Grâce à l’excellente qualité des modèles de variation établis, la cohérence entre les limites de spécification des mesures électriques et physiques peut être discutée. Le Tableau 29 présente la comparaison entre les anciennes limites de spécifications et celles déduites des modèles établis.

		CD - Gravure Via	TH SiOC - Gravure Ligne	TH SiOC - CMP L2
Limites de spécification déduites des corrélations	Spécification Basse	0.12	2200	5400
	Cible	0.1375	3000	6100
	Spécification Haute	0.155	3800	6800
Anciennes limites de spécification	Spécification Basse	0.115	2300	5450
	Cible	0.135	3000	6250
	Spécification Haute	0.155	3700	7050

Tableau 29. Spécifications des mesures physiques du module métal 2 déduites des modèles statistiques établis.

Les résultats concernant les mesures d'épaisseur de SiOC montrent la nécessité de serrer les limites afin de garantir la performance électrique des interconnexions du niveau métal 2.

V- Conclusion

Le chapitre 5 a permis de caractériser l'ensemble des corrélations entre les mesures physiques & électriques. D'un autre côté, l'analyse des paramètres FDC a révélé un manque de pertinence des différents paramètres collectés. La Figure 111 récapitule les corrélations établies (seules les corrélations supérieures à 5% sont représentées).

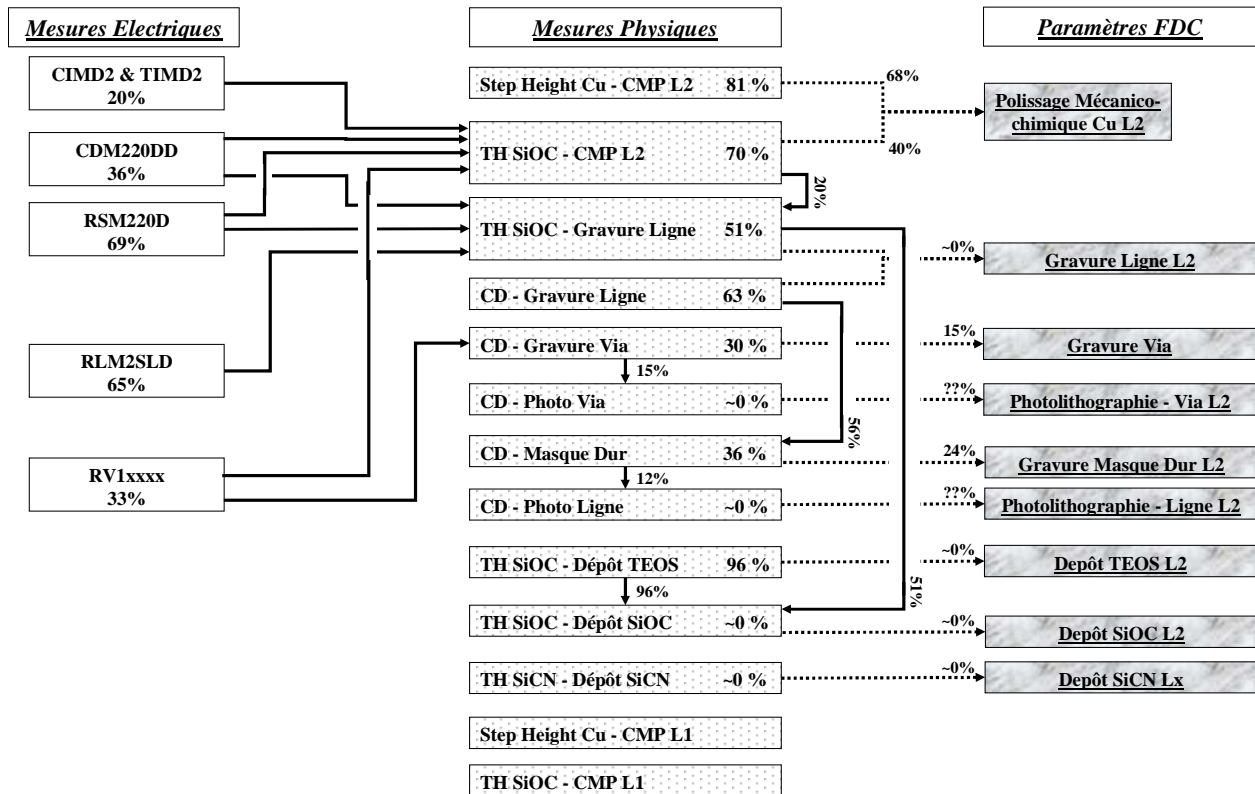


Figure 111. Récapitulatif des corrélations entre l'ensemble des mesures du module interconnexions L2.

Cette modélisation multivariée statistique a cependant identifié la nature et l'origine de la variabilité des résistances des lignes de cuivre pour le niveau métal 2. Cette quantification a débouché sur la proposition et la simulation d'une boucle de régulation au niveau du procédé de plissage mécano-chimique. Ce système d'asservissement, notamment proposé pour diminuer la variabilité du procédé de CMP, compense l'influence de la durée de vie des consommables.

Bibliographie des chapitres 2, 3 et 4

Bibliographie des chapitres 2, 3 et 4

- [ABBAS 2003], ABBAS Emami-Naeini, Modelling and Control of Distributed Thermal Systems, IEEE Transactions on Control Systems Technology Vol.11, N°5, p.668-683, 2003
- [ALMGREN 1997], ALMGREN Carl, The role of RF Measurements in Plasma Etching, Semiconductor Manufacturing, p.99-104, 1997
- [BIHARE 2002], BIHARE Cyril, Etude de la detection de fin de gravure de grille par interférométrie optique, Projet de fin d'étude à l'école ENSPG option Physique des composants, 2002
- [BURKE 1991], BURKE Peter A., Semi-Empirical Modelling of SiO₂ Chemical-Mechanical Polishing Planarization, 1991 VMIC Conference, p.379-384, 1991
- [BYUNGWHAN 1999], BYUNGWHAN Kim, A Neural Network Model of Semiconductor Manufacturing Equipment, 1999 IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings, Seoul Korea August 22-25, p.289-291, 1999
- [BYUNGWHAN 2001], BYUNGWHAN Kim, Modelling Plasma Equipment Using Neural Networks, IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing Vol.29, N°1, p.8-12, 2001
- [CALVIER 2005], CALVIER Jean-Jérôme, Improve hot Phosphoric process robustness in 300mm nitride strip wet bench, IEEE International symposium in Semiconductor Manufacturing, p.438- 441, 2005
- [CARD 2002], CARD Jill, Using neural networks for intelligent plasma etch process control, Solid State Technology, p.33-36, 2002
- [CHEN 1994], CHEN Yunzhong, 3D Modelling of Rapid Thermal Processors for Design Optimisation of a New Flexible RTP System, IEDM 21.2.1-21.2.4, 1994
- [CHO 1993], CHO Young Man, Model Identification in Rapid Thermal Processing Systems, IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing Vol.6, N°3, p.233-245, 1993
- [CHOI 2003], CHOI Jin Young, Adaptive Control Approach of Rapid Thermal Processing, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing Vol.16, N°4, p.621-632, 2003
- [CHONG 2004], CHONG Robert, Optimising STI etch process control using optical digital profilometry, Micromagazine.com, 2004
- [CUNGE 2004], CUNGE Gilles, Influence of reactor walls on plasma chemistry and on silicon etch product densities during silicon etching processes in halogen-based plasma, Plasma Sources Science Technology, Vol. 13, p.522-530, 2004

- [DEATON 1992], DEATON Russell, Manufacturability of Rapid-Thermal Oxidation of Silicon: Oxide Thickness, Oxide Thickness Variation, and system dependency, IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing Vol.5, N°4, p.347-358, 1992
- [DE CAUNES 2006], de CAUNES Jean, Design and Use of Multivariate Approach Error Analysis APC System, ST Microelectronics internal publication, 2006
- [DELFINO 1992], DELFINO Michelangelo, Wavelength-Specific Pyrometry as a Temperature Measurement Tool, IEEE Trans. on Electron Devices, Vol.39, N°1, p.89-95, 1992
- [EICHHORN 2005], EICHHORN Lutz, APC for plasma processing, 6th European AEC/APC Conference, Dublin, April 6-8, 2005
- [EISELE 2002], EISELE I., Growth Modes and Characterization of Thin RTP silicon oxides, 10th IEEE International Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors – RTP, p.11-14, 2002
- [EL CHEMALI 2000], EL CHEMALI C., Multizone uniformity control of a chemical mechanical polishing process utilizing a pre- and post measurement strategy, J. Vac. Sci. Technol. A(18)4, p.1287-1296, 2000
- [FISHER 2005], FISHER Stephen, Modelling interconnect Variation – Optional or mandatory?, semiconductor international Vol.28, N°8, p.63-72, July 2005
- [FORTUNA 1996], FORTUNA L., A neural Networks Approach to Control the Temperature on Rapid Thermal Processing, p.649-652, 1996
- [GEISLER 2000], GEISLER Joseph P., Neurofuzzy Modelling of Chemical Vapor Deposition Processes, IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing Vol.13, N°1, p.46-60, 2000
- [GYURCSIK 1993], GYURCSIK Ronald S., Model-Based Control of Semiconductor Processing Equipment: Rapid Thermal Processing Example, p.13-18, 1993
- [HAMBY 1995], HAMBY E., A Control Oriented Modelling Methodology for Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition Processes p.220-224, Proceedings of the American Control Conference Seattle, Washington, 1995
- [HAN 1993], HAN Seung-Soo, Neural Network-Based Modelling of the Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition of Silicon Dioxide, 1993 IEEE/CHMT Int'l Electronics Manufacturing Technology Symposium, p.458-463, 1993
- [HAN 1994], HAN Seung-Soo, Modelling the Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition Using Neural Networks and Genetics Algorithms, IEEE, p.760-763, 1994
- [HIMMEL 1993], HIMMEL Christopher, Advantages of Plasma Etch Modelling Using Neural Networks Over Statistical Techniques, IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing, Vol.6, N°2, p.103-111, 1993
- [JAN 1998], JAN Yaw-Kuen, Lamp configuration Design for Rapid Thermal Processing Systems, IEEE Trans. on semiconductor manufacturing, Vol. 11, N° . 1, p.75-84, 1998

- [JENKINS 1986], JENKINS Mary W., The modelling of Plasma Etching Processes Using Response Surface Methodology, Solid State Technology, p.175-182, 1986
- [KAMMINS 1988], KAMMINS Ted, Polycrystalline Silicon for Integrated Circuit Applications”, Chap 1., Kluwer Academic Publishers, 1988
- [KIM 2001], KIM S.J., Performance Analysis of a Rapid Thermal Processor via Physics-Based Modelling and Convex Optimisation, ISIE 2001, p.1213-1218, 2001
- [KOGELSCHATZ 2004], KOGELSCHATZ M., Etude des interactions plasma-surface pendant la gravure du silicium dans des plasmas HBr/Cl₂/O₂, Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier - GrenobleI, 2004
- [LIN 2001], LIN Ching-An, Control System Design for a Rapid Thermal Processing System, IEEE Transactions on Control Systems Technology Vol.9, N°1, p.122-129, 2001
- [LUDSTECK 2004], LUDSTECK A., Growth model for Thin oxides and oxide optimisation, Journal of Applied physics, Vol.95, N°5, p.2827-2831, 2004
- [LUO 2001], LUO Jianfeng, Material Removal Mechanism in Chemical Mechanical Polishing: Theory and Modeling, IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing Vol.14, N°2, p.112-132, 2001, May
- [MATHIOT 2000], MATHIOT Daniel, Dopage et Diffusion dans le silicium, cours à l’Institut d’Electronique du Solide et des Systèmes, 2000
- [MAY 1991], MAY Gary S., Statistical Experimental Design in Plasma Etch Modelling, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing Vol.4, N°2, p.83-98, 1991
- [MONTGOMERY 2001], MONTGOMERY Douglas C., Introduction to Statistical Quality Control, John Wiley & sons, ISBN 0-471-31648-2, 2001
- [NANZ 1995], NANZ Gerd, Modelling of Chemical-Mechanical Polishing: A Review, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing Vol.8, N°4, p.382-389, 1995, November
- [NISHIMURA 2002], NISHIMURA Hiroshi, Gap-Fill Process of Shallow Trench Isolation for 0.13µm Technologies, Journal of Applied Physics, VOL. 41, N°. 5A, p.2886-2893, 2002
- [OUMA 1998], OUMA Dennis, An Integrated Characterization and Modelling Methodology for CMP Dielectric Planarization, IITC 98, p.67-69, 1998
- [OKUMU 2002], OKUMU Ouma D., Characterization and Modelling of Oxide Chemical-Mechanical Polishing Using Planarization Length and Pattern Density Concepts, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing Vol.15, N°2, p.232-244, 2002
- [PERRIN 2000], PERRIN Emmanuel, Etude et modélisation de l’aplanissement par polissage mécano-chimique des diélectriques dans les interconnexions des circuits intégrés, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2000
- [SCHAPER 1991], SCHAPER Charles D., Modelling and Control of Rapid Thermal Processing, Rapid Thermal and Integrated Processing Vol.1595, p.2-17, 1991

- [SCHAPER 1992], SCHAPER Charles D., Low-Order Modeling and Dynamic Characterisation of Rapid Thermal Processing, Applied Physics. Vol.54, p.317-326, 1992
- [SHIUL 2004], SHIUL Sheng-Jyh, Multivariable Control of Multi-Zone Chemical Mechanical Polishing, IEEE 107-110, 2004
- [SHON-ROY 1998], SHON-ROY Lita, Advanced Semiconductor Fabrication Handbook, Integrated Circuit Engineering, 1998
- [STINE 1998], STINE B., Rapid Characterization and Modelling of Pattern-Dependent Variation in Chemical-Mechanical Polishing, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing Vol.11, N°1, p.129-140, 1998
- [STUBER 1994], STUBER J.D., Model-Based Control of Rapid Thermal Processes, Proceedings of the 33th Conference on Decision & Control Lake Buena Vista, p.79-85, 1994
- [SULLIVAN 2001], SULLIVAN Neal, Exploring ISSG Process Space, 9th Int. Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors-RTP, p.95-110, 2001
- [THIRIEZ 2004], THIRIEZ Hervé, La modélisation du risque - Simulations de Monte Carlo, Collection Gestion, 2004
- [TUFFERY 2005], TUFFERY Stéphane, Data Mining et statistique décisionnelle, Editions Technip, ISBN 2-7108-0867-6, 2005
- [WANG 2002], WANG Jiangxian, Real-time furnace modelling and diagnostics, IEEE Transactions on semiconductor manufacturing, VOL. 15, N°. 4, November 2002
- [WANG 2004], WANG Gow-Bin, Wafer by Wafer Control in CMP System with Metrology Delay, IEEE, p.178-181, 2004
- [WOLF 2000], WOLF Stanley, Silicon Processing for the VLSI ERA Volume 1, Lattice Press, 2000
- [YI 2003], YI Jingang, Neural Network Based Uniformity Profile Control of Linear Chemical-Mechanical Planarization, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing Vol.16, N°4, p.609-620, 2003
- [YI 2004], YI Jingang, On the wafer/pad Friction of linear chemical-mechanical planarization (CMP): modelling, analysis and experiments, Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston, Massachusetts June 30 - July 2, 2004
- [ZHANG 2002], ZHANG Bin, The modelling and Control of a Reheating Furnace, Proceedings of the american Control Conference, Anchorage, 8-10 May 2002

Conclusion générale

Conclusion générale

Les impératifs technologiques liés à la miniaturisation des circuits intégrés nécessitent une maîtrise de la variabilité des procédés toujours plus pointue. Afin de contrôler cette variabilité, et ainsi garantir les performances électriques des circuits intégrés, plusieurs méthodes sont aujourd'hui déployées telles que le "Contrôle Statistique des Procédés" (SPC), la "Fault Detection And Classification" (FDC) et le "Run to Run" (R²R). Toutefois, comme nous l'avons constaté dans l'introduction de ce manuscrit, chacune de ces méthodes est implémentée de façon indépendante et ceci malgré les liens existant entre ces moyens de contrôle.

La problématique de cette thèse était de proposer une méthodologie qui, basée sur l'utilisation d'outils statistiques, permet d'optimiser le lien entre les trois composantes du contrôle des procédés précédemment citées. L'objectif général est d'utiliser les résultats des modélisations statistiques entre les mesures physiques et électriques et les paramètres des équipements afin :

- De caractériser l'origine et la nature de la variabilité des performances électriques des circuits intégrés au niveau des procédés de fabrication afin de proposer des actions pour la réduire,
- D'optimiser la cohérence entre les contrôles SPC et FDC pour améliorer le contrôle de la variabilité des mesures électriques et physiques.

Au commencement de ce travail, nous avons donc pour principaux objectifs :

- De faire un état des lieux des méthodes d'analyses statistiques de données utilisées pour caractériser la variance des propriétés physiques et électriques des circuits intégrés,
- De proposer, le cas échéant, de nouvelles méthodes basées sur des outils statistiques novateurs afin d'améliorer cette caractérisation,
- D'appliquer les méthodes développées à des cas concrets tel que la modélisation de la variabilité des opérations de fabrication utilisées pour l'élaboration de l'isolation entre les transistors (module d'isolation), pour la fabrication du transistor (module grille) et pour la création d'un niveau d'interconnexions (module métal 2) pour la technologie 90nm.

Tout d'abord, afin de justifier l'apport d'outils d'analyses statistiques novateurs, les lacunes des approches existantes ont été identifiées dans le chapitre 1. Nous avons notamment montré que les approches "standard" présentent les limitations suivantes :

- La nécessité d'étudier des tableaux de données comportant un grand nombre d'observations par rapport au nombre de variables étudiées et surtout sans valeur manquante,
- L'impossibilité de quantifier les interactions entre les variables analysées. Hors, dans le domaine des semi-conducteurs, beaucoup de mesures physiques et électriques interagissent les unes avec les autres,
- La difficulté de modéliser des corrélations fortement non linéaires entre les paramètres.

Cet état des lieux a ensuite permis de proposer de nouvelles approches afin de combler les lacunes précédemment décrites. Deux solutions logicielles ont ainsi été proposées :

- La solution "Simca-P" basée sur des algorithmes multivariés permettant de répondre aux deux premiers manques identifiés,
- La solution "Neuro-one" utilisant des algorithmes d'apprentissages permettant de modéliser des comportements non linéaires.

Les chapitres 2, 3 et 4 ont respectivement présenté les résultats des modélisations entre les mesures électriques et physiques et les paramètres des équipements pour les modules "d'isolation", "grille" et "métal 2". Pour chacun des trois cas d'études, les analyses multivariées ont quantifié l'ensemble des *relations linéaires* entre les trois types de mesures étudiés. Les *modélisations neuronales* ont permis, dans certains cas présentant de fortes non linéarités, d'améliorer la qualité des modélisations. L'association entre les méthodes d'analyses statistiques proposées et l'expertise physique des résultats a permis de caractériser de façon globale, l'origine et la nature de la variabilité des mesures électriques au niveau des procédés de fabrication par corrélation avec les mesures physiques puis jusqu'au niveau des équipements de procédé par corrélation avec les paramètres FDC. La méthodologie développée a permis en particulier :

- De modéliser les corrélations entre chacune des mesures physiques effectuées sur les plaques de production,
- De quantifier l'impact des variations de ces mesures physiques sur la variabilité des performances électriques des circuits élaborés,
- De comprendre l'origine de la variabilité des mesures physiques au niveau des équipements en corrélant ces mesures aux paramètres des machines collectés par le système FDC.

La modélisation de la variabilité des mesures électriques et physiques a ensuite donné lieu à des propositions de réduction de ces variations afin d'améliorer les performances électriques des circuits fabriqués :

- Concernant le module "d'isolation", la variabilité lot à lot du Step Height (mesure physique effectuée en toute fin du module "d'isolation" représentant la hauteur de marche entre les zones actives et non actives) représente 30% de la variabilité totale de ce paramètre. L'implémentation d'une boucle de régulation R²R de type Feed Forward au niveau de la gravure humide ON vise à réduire cette dispersion. Le principe de cette boucle consiste à ajuster le temps de la gravure humide afin d'obtenir la valeur de Step Height souhaitée. Les simulations prédisent une amélioration de l'ordre de 60% de la dispersion lot à lot du Step Height.
- Concernant le module "grille", plusieurs solutions visant à réduire les dispersions lot à lot, plaque à plaque et site à site des courants de saturation à l'état On des transistors ont ainsi été proposées :
 - L'implémentation d'une boucle de régulation R²R de type Feed Forward entre la photolithographie et la gravure grille afin de réduire la dispersion lot à lot des dimensions physiques de la grille. Le principe de cet asservissement est de modifier le temps de gravure lors l'étape de "Trim" afin d'obtenir les dimensions des motifs voulus. Les résultats obtenus montrent une amélioration de 30% environ de la dispersion des dimensions physiques de la grille,
 - La mise en place d'une boucle de régulation R²R de type Feed Back jouant sur les zones températures du four lors de l'étape de dépôt du nitrure spacer afin de réduire la dispersion plaque à plaque au sein d'un même lot. Ce système d'asservissement permet une diminution de 50% de cette variabilité,
 - L'optimisation de l'uniformité intra- plaque de la gravure spacer. Cette optimisation de procédé, effectuée à partir d'un plan d'expérience, prédit une réduction de 30% de cette dispersion.
- Concernant le module d'interconnexion "métal 2", l'implémentation d'une boucle de régulation R²R de type Feed Back a été proposée au niveau de l'opération de polissage des lignes de cuivre. Ce système d'asservissement vise à réduire l'effet de l'usure des consommables de la machine de polissage sur l'épaisseur polie en modifiant le temps de procédé. Cette boucle permet de réduire de la dispersion lot à lot de 30%.

Enfin, les modèles de variations établis ont permis de vérifier la cohérence entre les contrôles associés aux mesures électriques et physiques (contrôle SPC) et aux paramètres FDC (contrôle FDC). Concernant les modélisations entre les mesures physiques et les paramètres des équipements, la pertinence des paramètres FDC collectés dépend du type de procédé :

- Lorsque les variations des procédés d'oxydation rapide sont "suffisamment importantes" (variabilité engendrée sur la croissance d'oxyde supérieure à 2 Å), les paramètres FDC (et particulièrement la puissance des zones de chauffe) permettent d'expliquer très correctement la variabilité des mesures physiques associées.
- Pour les opérations de dépôt nitrure et TEOS de type Low Pressure Chemical Vapor Deposition, les modélisations effectuées permettent de comprendre l'origine de la variabilité de l'épaisseur déposée sur les plaques de production en fonction des paramètres FDC collectés. Cependant, les résultats obtenus pour les plaques témoins indiquent une très faible qualité de modélisation.
- Les opérations de dépôts de type Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition montrent des résultats disparates suivant le type de machine utilisée et par conséquent suivant la nature des paramètres FDC collectés. Nous noterons ainsi que les variations des épaisseurs déposées lors de la réalisation des interconnexions ne peuvent pas être prédites par les paramètres FDC collectés lors du procédé. Néanmoins, nous avons démontré dans le chapitre 2 que les paramètres FDC collectés pendant l'étape de remplissage des tranchées d'isolation permettent d'expliquer un pourcentage important de la variabilité de l'épaisseur d'oxyde déposée. Les principaux paramètres FDC corrélés étant la température de la plaque agissant sur la réaction chimique ainsi que la pression dans la chambre jouant sur les propriétés du plasma.
- Les modélisations effectuées entre les paramètres FDC collectés lors des opérations de gravure sèche et les dimensions des motifs obtenus après le procédé sont de très faible qualité. En effet, pour chacun des procédés étudiés, la variabilité des mesures physiques ne s'explique pas à l'aide des paramètres FDC disponibles. Pour justifier ces résultats, plusieurs hypothèses basées sur de récentes publications ont été soumises. La plus vraisemblable semble être l'influence de la qualité des parois pendant le procédé qui ne peut être caractérisé à l'aide des paramètres FDC collectés aujourd'hui.
- Concernant l'opération de gravure humide utilisée lors du module "d'isolation", les modélisations entre l'épaisseur d'oxyde restant et les paramètres FDC collectés révèlent de très bons résultats. Nous avons ainsi démontré dans le chapitre 2 que 70% de la variabilité de cette épaisseur d'oxyde est prédite à l'aide d'un seul paramètre FDC caractérisant l'âge du bain de H₃PO₄ utilisé.
- Les paramètres FDC collectés lors des opérations de polissage mécano-chimique des modules "d'isolation" et "métal 2" permettent également de prédire correctement l'épaisseur polie durant le procédé. Nous avons statistiquement et physiquement démontrés dans les chapitres 2 et 4 que la variabilité de l'épaisseur polie provient de l'usure des consommables de la machine de polissage.

Ensuite, basé sur les modèles établis et les limites utilisées pour le contrôle SPC, le contrôle FDC a ainsi été optimisé en définissant de manière statistique les limites à appliquer sur chacun des paramètres FDC pertinents identifiés.

L'ensemble des travaux effectués dans le cadre de ce doctorat a débouché sur la proposition d'une méthodologie globale permettant de caractériser, à l'aide d'outils statistiques novateurs, la variabilité des performances électriques des circuits au niveau des procédés de fabrication par corrélation avec les mesures physiques puis au niveau des paramètres FDC des équipements. Ces modélisations statistiques ont abouti à des solutions visant à optimiser les performances électriques des circuits élaborés.

Les perspectives à court terme de ce travail se situent au niveau de la diffusion des méthodes présentées dans ce mémoire auprès des ingénieurs du site industriel de Crolles 2. Ce travail de diffusion doit également s'accompagner du déploiement des outils informatiques permettant l'application de ces nouveaux concepts à savoir :

- Le logiciel "Simca-P" incluant les méthodes d'analyses multivariées,
- L'application "Neuro-one" permettant de modéliser des relations non linéaires,
- La solution s'appuyant sur les Fonctions Radiales de Base (RBF) permettant de reconstituer précisément le profil de la plaque à partir des mesures physiques ou électriques.

A plus long terme et pour assurer un contrôle optimum de la variabilité des procédés, il est intéressant d'étudier complètement le fonctionnement de chacun des procédés de fabrication. L'objectif est de définir le ou les nouveaux paramètres FDC à collecter afin de prédire plus précisément les résultats des mesures physiques et électriques sur les plaques. Si nous prenons l'exemple des procédés de gravure sèche, de nouveaux paramètres FDC permettant de caractériser l'état des parois doivent être pris en compte pour prévoir les variabilités des dimensions des motifs obtenus après le procédé. Concernant la recherche de ces nouveaux paramètres, nous proposons deux voies d'études. La première voie s'appuie sur la connaissance des ingénieurs de recherche et de production des paramètres FDC critiques à contrôler. La seconde voie consiste à utiliser des méthodes de simulations numériques de type éléments finis afin de modéliser complètement le comportement physique d'un équipement et par conséquent prédire le résultats sur les plaques. Dans le cas d'un procédé d'oxydation rapide, ce type de modélisation physique devra permettre de modéliser la température de chaque élément de la plaque en fonction de la puissance fournie par les lampes (phénomène de radiation), de la température des éléments voisins de la plaque (phénomène de conduction) et de l'écoulement des gaz dans la chambre et à la surface de la plaque (phénomène de convection).

Le succès de ces deux axes de recherche résident dans la possibilité de prédire précisément le résultat sur la plaque (concept de "Métrologie virtuelle").

Table des figures

Figure 1. Opérations de contrôle effectuées au sein de la ligne de production	11
Figure 2. Représentations temporelle (a) et univariée (b) de la tension d'autopolarisation pendant un procédé de gravure sèche.	14
Figure 3. Principe de la régulation de type "Feedback" appliquée en photolithographie.....	15
Figure 4. Principe de la régulation de type "Feed forward" appliquée en CVD-CMP.....	15
Figure 5. Calcul du Cpm et représentation des distributions de chaque équipement de mesure d'épaisseur d'oxyde de grille. 2 cas : Faible (a) et forte (b) variabilité due à la mesure.....	27
Figure 6. Statut de l'implémentation des bases de données sur le site de Crolles 2 en janvier 2006.	27
Figure 7. Exemple de représentation d'un box plot.....	29
Figure 8. Centrage et réduction des données.	29
Figure 9. Indicateur Skewness en fonction de la forme de la distribution.....	30
Figure 10. Indicateur kurtosis en fonction de la forme de la distribution.....	30
Figure 11. Décomposition de variance de l'épaisseur d'oxyde restant après le polissage STI.	31
Figure 12. Alignement des profils de mesures.	32
Figure 13. Projection de deux mappings d'entrée différents selon un troisième mapping commun.....	32
Figure 14. Comparaison entre une interpolation de type polynomiale et la réalité.	33
Figure 15. Régression ACP en dimension 3.....	40
Figure 16. Principe de la régression ACP pour un système à 3 dimensions	40
Figure 17. Corrélation entre variables initiales et composantes principales.....	41
Figure 18. Représentation des observations lors d'une analyse PLS	42
Figure 19. Exemple de graphique d'Importance des Variables dans la projection.	43
Figure 20. Exemple de corrélations univariées entre 2 paramètres.	44
Figure 21. Modélisation multivariée et univariée.....	46
Figure 22. Représentation d'un neurone biologique.....	47
Figure 23. Modèle mathématique d'un neurone.....	48
Figure 24. La fonction Sigmoidale.....	48
Figure 25. Réseau de neurones à connexion totale à trois entrées (1, 2 et 3), 1 sortie (6) et 1 couche intermédiaire de 2 neurones (4, et 5).....	49
Figure 26. Exemples d'estimation d'une fonction.....	51
Figure 27. Déroulement de la recherche de corrélation entre les mesures électriques & physiques et les paramètres des équipements.....	55
Figure 28. Méthode de réduction de la variance basée sur l'analyse de données.....	56
Figure 29. Méthode de calcul des limites de spécification basée sur les corrélations entre les paramètres.....	57
Figure 30. Enchaînement des opérations de fabrication du module d'isolation.....	64
Figure 31. Représentation des couches mesurées dans le module d'isolation.....	64
Figure 32. Influence du Step Height sur le rendement final des circuits (technologie 90nm).	65
Figure 33. Répartitions des mesures pour chacune des opérations de métrologie du module STI.....	66

Table des Figures

Figure 34. Evolution des dimensions des zones actives en fonction des dimensions des motifs après photolithographie.	69
Figure 35. Profondeur de tranchée mesurée vs profondeur de tranchée réelle.....	70
Figure 36. Influence de l'épaisseur de nitrure STI déposée sur la profondeur des tranchées gravées.	70
Figure 37. Influence des dimensions des zones actives sur le remplissage des tranchées.....	70
Figure 38. Influence des opérations du module STI sur l'épaisseur de nitrure mesurée après polissage.....	71
Figure 39. Influence des procédés de polissage STI et gravure ON sur la mesure du Step Height.....	72
Figure 40. Influence de la gravure humide ON STI sur l'empilement des couches.....	72
Figure 41. Impact des variations du Step Height sur les dimensions des motifs mesurés après les opérations de photolithographie associées aux implantations des zones actives	74
Figure 42. Décomposition de variance de paramètres du module d'isolation.....	75
Figure 43. Fonctionnement de la boucle de régulation Feed forward appliquée à la gravure humide.....	76
Figure 44. Simulation des résultats de la boucle de régulation STI.	77
Figure 45. Impact de l'amélioration de la dispersion intra-plaque sur la pente des motifs après gravure STI	77
Figure 46. Représentation des structures de test de type "résistances carrées dopées non silicurées"	82
Figure 47. Evolution des résistances carrées RSSDN11 & RSSDP11 en fonction de la largeur physique des zones actives.	83
Figure 48. Représentation en coupe de la structure utilisée pour mesurer le paramètre RSNW_STI.....	84
Figure 49. Corrélations entre le paramètre RSNW_STI et les mesures physiques du module STI.	84
Figure 50. Schéma de la structure de test utilisée pour mesurer la largeur électrique des zones actives.	85
Figure 51. Corrélation entre les dimensions électriques et physiques des zones actives.	86
Figure 52. Structure utilisée pour mesurer les tensions de claquage des jonctions p-n sous la tranchée STI.	87
Figure 53. Structure de test employée pour estimer la tension de claquage BVNWNW100 (double jonction p-n).....	88
Figure 54. Influence des variations de dimensions des zones actives sur les caractéristiques électriques des transistors de type NMOS à faible largeur de zone active (W : 0.12µm).	89
Figure 55. Décomposition de variance des mesures électriques corrélées à la valeur du Step Height.	90
Figure 56. Représentation d'un équipement d'oxydation rapide.....	92
Figure 57. Indicateurs de qualité des modèles statistiques de variations des procédés d'oxydation STI.....	94
Figure 58. Principaux paramètres FDC corrélés aux variations d'épaisseur d'oxyde Pad.....	94
Figure 59. Influence de la puissance délivrée aux lampes du four RTP sur le profil de croissance d'oxyde Pad.....	95
Figure 60. Représentation d'une chambre de gravure de type TCP.....	96
Figure 61. Représentation schématique d'un équipement de HDP CVD.....	97
Figure 62. Influence de la pression et de la température pendant le procédé CVD STI sur l'épaisseur d'oxyde moyenne déposée	99
Figure 63. Influence de la pression et de la température SIDE pendant le procédé de CVD STI sur la dispersion intra-plaque d'oxyde déposé.....	100
Figure 64. Profil de l'épaisseur d'oxyde déposée après CVD STI correspondant à une faible (a) et à une forte dispersion (b).	100
Figure 65. Analyse du plan d'expérience du procédé de dépôt Chimique en Phase Vapeur - HDP STI. ..	101

Table des Figures

Figure 66. Représentation d'un équipement de polissage mécanico-chimique.....	103
Figure 67. Influence de la durée de vie des consommables du plateau 2 sur la stabilité du procédé de polissage STI.....	106
Figure 68. Influence de l'usure du plateau de polissage STI sur la dispersion intra-plaque de l'oxyde poli.....	106
Figure 69. Apport simulé de l'implémentation d'une boucle de régulation au niveau polissage STI.....	107
Figure 70. Influence du vieillissement du bain de H_3PO_4 sur la stabilité de la gravure humide ON STI. .	109
Figure 71. Récapitulatif des corrélations entre l'ensemble des mesures du module STI.	110
Figure 72. Enchaînement des opérations de fabrication des transistors pour la technologie 90nm.	113
Figure 73. Représentation des couches mesurées dans le module grille	114
Figure 74. Distribution des mesures Ion, Ioff et de V_t et spécifications associées pour des transistors NMOS et PMOS de dimensions $W=1\mu m$ & $L=0.1\mu m$	115
Figure 75. Distribution des mesures physiques du "module grille".	116
Figure 76. Décomposition de variance des mesures physiques corrélés aux variations des courants Off & On des transistors.	122
Figure 77. Dispersion de la largeur de grille avant et après implémentation de la boucle de régulation Feedforward grille.....	123
Figure 78. Représentation d'un four TEL Formula & évolution de l'épaisseur moyenne de Nitrure déposée en fonction de la position des plaques.....	123
Figure 79. Inversion de profil dans le four TEL en fonction des conditions expérimentales.....	124
Figure 80. Vitesse de déposition du nitrure en fonction de l'épaisseur cumulée dans le four.....	125
Figure 81. Modélisation de l'épaisseur de nitrure déposée dans les 5 zones de température du four en fonction des consignes de température appliquées.....	125
Figure 82. Fonctionnement de la boucle de régulation des fours nitrure.	126
Figure 83. Modélisation des variations des motifs en fonction des paramètres de la gravure.	127
Figure 84. Mesure des courants Ion NMOS et PMOS versus valeurs prédites par les modèles statistiques multivariés.....	127
Figure 85. Utilisation du modèle de prédiction des performances électriques des transistors.....	128
Figure 86. Profils d'azote en fonction des conditions expérimentales de nitruration plasma.	131
Figure 87. Comparaison entre les profils d'azote mesuré et prédit par le modèle neuronal.....	132
Figure 88. Représentation schématique d'un four LPCVD de type Tokyo Electron – TEL.....	133
Figure 89. Reconstruction du profil d'épaisseur des plaques témoins utilisées lors du dépôt polysilicium.....	133
Figure 90. Influence des températures du four sur la dispersion des épaisseurs de polysilicium déposées.....	134
Figure 91. Corrélation entre l'épaisseur d'oxyde de grille restante après gravure et la position d'une capacité d'ajustement du générateur RF.	138
Figure 92. Corrélation entre l'épaisseur d'oxyde de grille restante après gravure et la position d'une capacité d'ajustement du générateur RF.	138
Figure 93. Influence de la température centrale du four sur l'épaisseur de nitrure offset déposée sur les plaques de production.....	141
Figure 94. Influence des températures TOP-SP et Top-S sur la dispersion des plaques témoins lors du dépôts nitrure offset.....	142

Figure 95. Représentation schématique de la chambre de gravure de type "Dual Frequency Confined".	143
Figure 96. Corrélation entre la largeur de l'offset et le paramètre FDC "ESCBiasVoltage_AI".	144
Figure 97. Corrélations entre le temps de sur gravure, l'intensité de l'émission optique 4 et l'écart type intra-plaque de l'épaisseur de TEOS après gravure offset.	144
Figure 98. Corrélation entre la largeur des espaceurs et les paramètres FDC "RF2MHzGenForwardPower_AI" et "ESCBiasVoltage_AI".	146
Figure 99. Récapitulatif des corrélations entre l'ensemble des mesures du module grille.	149
Figure 100. Niveaux d'interconnexion pour la technologie 90nm.	151
Figure 101. Opérations de fabrication pour l'élaboration des interconnexions pour la ligne x.	151
Figure 102. Représentation des principales mesures effectuées dans le module interconnexions.	152
Figure 103. Répartitions des mesures physiques effectuées lors module "Métal 2".	153
Figure 104. Coupe TEM du niveau d'interconnexion Métal 2.	156
Figure 105. Représentation d'un équipement de type AMAT-Producer.	157
Figure 106. Influence de l'usure du disque de diamant sur le dishing du cuivre post CMP.	164
Figure 107. Corrélation entre le dishing du cuivre et les caractéristiques des têtes de polissage.	165
Figure 108. Décomposition de variance des mesures physiques & électriques du module métal 2.	166
Figure 109. Proposition de boucle de régulation pour la réduction de la variabilité des résistances électriques des lignes de métal.	167
Figure 110. Distribution de l'épaisseur enlevée avec et sans boucle de régulation CMP Cu.	169
Figure 111. Récapitulatif des corrélations entre l'ensemble des mesures du module interconnexions L2.	170
Figure 112. Impact du procédé de photolithographie grille sur les dimensions des motifs après gravure grille.	194
Figure 113. Influence des variations des dimensions de la grille sur la largeur de l'offset.	196
Figure 114. Impact des variations des mesures physiques du module grille sur les dimensions du spacer.	197
Figure 115. Corrélation entre les épaisseurs de TEOS restants après gravure Si Protect et Spacer.	198
Figure 116. Corrélation entre les largeurs physiques et électriques de la grille.	198
Figure 117. Schéma des structures TP1PNW (a) et TP1NPW (b).	199
Figure 118. Corrélations entre les épaisseurs physique et électrique de l'oxyde GO1.	200
Figure 119. Représentation des structures INFING (diode N+/Pwell) et INPOLY.	200
Figure 120. Influence de l'épaisseur de TEOS après gravure spacer sur les courant de fuite INFINGU & IPFINGU.	201
Figure 121. Influence de l'épaisseur de TEOS et de la largeur des motifs mesurés après gravure spacer sur les courant de fuite de jonction des structures INPOLY et IPPOLYU.	202
Figure 122. Influence de l'épaisseur de TEOS après gravure Spacer et des dimensions des motifs après photolithographie NSD et PSD sur les mesures de résistance de type RSSDx3_UN.	203
Figure 123. Corrélations entre la mesure de résistance RSPP3_UN et l'épaisseur d'oxyde TEOS après gravure spacer et la dimension des motifs après photolithographie PSD.	204
Figure 124. Schéma de principe d'un transistor NMOS conventionnel.	204
Figure 125. Influence des dimensions de la grille sur les principales caractéristiques des transistors.	205
Figure 126. Variations des mesures électriques des transistors en fonction des dimensions de la grille et du spacer.	207

Table des Figures

Figure 127. Impact des variations du CD photo ligne sur la dimension des motifs après gravure du masque dur.	214
Figure 128. Impact des variations des dimensions après la gravure du masque dur et la photolithographie ligne sur les dimensions des motifs après gravure ligne.	215
Figure 129. Corrélation entre les épaisseurs de SiOC après déposition et après gravure ligne.....	215
Figure 130. Influence de la variabilité des épaisseurs de SiOC après dépôt SiOC et après gravure ligne sur l'épaisseur de SiOC après CMP.	216
Figure 131. Corrélation entre les épaisseurs de SiOC et de Step Height Cu après polissage mécanico-chimique.	216
Figure 132. Structure de test RLM2SLD.....	217
Figure 133. Vue de dessus de la structure de test RSM220D.....	218
Figure 134. Influence de l'épaisseur de SiOC après gravure ligne sur la résistance des lignes de métal. .	218
Figure 135. Corrélation entre la mesure électrique RSM220D et les épaisseurs de SiOC mesurées après gravure ligne et après CMP.	219
Figure 136. Structure de test mesurant la capacité entre les lignes 1 et 2.	220
Figure 137. Relations entre le paramètre CIMD1 et les épaisseurs de SiOC après gravure ligne et après dépôt SiOC.	220
Figure 138. Vue SEM des chaînes de via.	221
Figure 139. Variations des résistances des vias haute densité en fonction de la dimension des via.	221

Table des tableaux

Tableau 1. Accessibilité aux données des outils du site de Crolles 2.....	28
Tableau 2. Comparaison des statistiques réelles et modélisées à partir des algorithmes polynomiaux et RBF.	34
Tableau 3. Classification exhaustive des techniques d'analyses de données descriptives et prédictives.....	35
Tableau 4. Liste des analyses prédictives employées en fonction de la nature des variables à expliquer et des variables explicatives.	36
Tableau 5. Synthèse des algorithmes d'analyse présents sur le site de Crolles2 et des outils proposés.....	37
Tableau 6. Exemples de domaines d'applications des algorithmes multivariés.....	45
Tableau 7. Exemples de domaines d'application des réseaux de neurones.....	52
Tableau 8. Table des corrélations entre les mesures physiques du module d'isolation.....	68
Tableau 9. Présentation des spécifications des mesures physiques du module STI. Comparaisons entre les limites utilisées par la ligne de production et celles déterminées à l'aide des modèles statistiques.....	78
Tableau 10. Pourcentage de mesures du Step Height hors spécification détecté à l'aide des spécifications calculées statistiquement. (période du 22 Août au 15 Novembre 2005).	79
Tableau 11. Modélisation de l'impact des variations des mesures physiques sur les principales mesures électriques du module d'isolation	81
Tableau 12. Impact de l'implémentation de la boucle de régulation "Gravure ON STI" sur la variabilité des mesures électriques du module STI.....	90
Tableau 13. Comparaison de la variabilité des paramètres FDC (CVD STI) entre les mesures de production et le plan d'expérience réalisé.....	100
Tableau 14. Variables équipements corrélées aux paramètres du plan d'expérience CVD STI.	101
Tableau 15. Limites de contrôle FDC proposées pour le procédé CVD STI.	102
Tableau 16. Récapitulatif de la configuration des procédés sur les 3 plateaux de CMP STI.	104
Tableau 17. Limites de contrôle FDC proposées à partir des modélisations du procédé de CMP STI.....	107
Tableau 18. Quantification des corrélations entre les mesures physiques du module grille.	118
Tableau 19. Modélisation de l'influence des variations des mesures physiques du module grille sur les principales mesures électriques effectuées.....	121
Tableau 20. Ajustement des limites de spécifications des mesures physiques du module grille.	128
Tableau 21. Optimisation du plan de contrôle FDC des fours de dépôt du polysilicium.	135
Tableau 22. Optimisation du plan de contrôle FDC des fours de dépôt nitrure Spacer.	142
Tableau 23. Optimisation du plan de contrôle FDC de la gravure Offset.	145
Tableau 24. Optimisation du plan de contrôle FDC de la gravure spacer.	147
Tableau 25. Optimisation du plan de contrôle FDC de la gravure spacer à l'aide du DoE effectué.	148
Tableau 26. Table de corrélation entre les mesures physiques du module métal 2.....	154
Tableau 27. Corrélation entre les variations des mesures électriques et physiques du module métal 2.....	155
Tableau 28. Optimisation du plan de contrôle FDC du procédé de polissage métal 2.....	165
Tableau 29. Spécifications des mesures physiques du module métal 2 déduites des modèles statistiques établis.	169

Annexes

Annexe 6. Etude détaillée de l'ensemble des corrélations entre les mesures physiques & électriques du module grille

I- Validation physique des corrélations statistiques entre les mesures physiques

Dans ce paragraphe, nous chercherons à confirmer ou infirmer physiquement les modèles statistiques établis.

I.1- Modélisation de la variabilité des dimensions des motifs après photolithographie N-predope

Les analyses multivariées montrent que 9% des variations de la dimension des motifs mesurés après l'opération de photolithographie N-predope sont corrélées à des variations de Step Height (phénomène de Swing Curve). Le faible degré de corrélation indique tout de même que cette dépendance reste minime dans la gamme de variabilité étudiée des mesures de nitrure.

I.2- Modélisation de la variance des dimensions des motifs après photolithographie grille

Les modélisations indiquent une influence du Step Height de l'ordre de 8% sur les dimensions des motifs après photolithographie grille. Ces résultats confirment les résultats obtenus dans le chapitre précédent ; Les analyses montraient alors l'influence des variations de Step Height sur la variabilité des différentes opérations de photolithographie du module grille.

I.3- Modélisation de la variabilité des dimensions des motifs après gravure grille

La Figure 112 présente l'influence des dimensions des motifs après photolithographie grille sur les mesures physiques effectuées après la gravure de la grille. Les corrélations indiquent un taux d'explication de l'ordre de 27%. Ce pourcentage prend également en compte l'impact du Step Height (Tableau 18) qui est de l'ordre de 3% ($= 27\% * 8\%$). Ces résultats montrent que près de 70% de la variance des dimensions de la grille proviennent de l'étape de gravure.

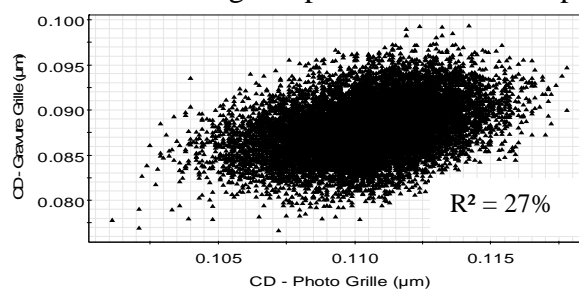


Figure 112. Impact du procédé de photolithographie grille sur les dimensions des motifs après gravure grille.

Comme pour la gravure des zones actives, les dimensions après la gravure de la grille sont environ 1.2 fois plus petites que celles mesurées après l'opération de photolithographie (gravure latérale du poly silicium). De plus, le coefficient de corrélation entre ces deux mesures est supérieur à 1 ce qui signifie que l'opération de gravure de la grille augmente la variabilité des dimensions des motifs.

1.4- Modélisation de la variabilité de l'épaisseur d'oxyde au niveau des tranchées après gravure grille

Les analyses statistiques multivariées montrent que près de 91% des variations de l'épaisseur d'oxyde au niveau des tranchées d'isolation dépendent des variations d'étapes précédentes (Tableau 18). La mesure « TH Oxyde - Gravure Grille (tranchée) » représente l'épaisseur d'oxyde dans les tranchées. Cette mesure est donc naturellement corrélée à la hauteur du Step Height. Ces analyses soulignent également une influence du procédé de croissance de l'oxyde GO1. Cette relation statistique ne trouve pas de justification au niveau physique. Une variation de quelques dizaines d'angströms de l'épaisseur d'oxyde GO1 ne peut induire une variation de plusieurs dizaines d'angströms de l'oxyde au niveau des tranchées.

Nous remarquons que 10% des variations de l'épaisseur d'oxyde au niveau des tranchées ne sont pas expliquées par les corrélations précédentes. Ce pourcentage de variabilité non expliqué peut provenir des erreurs de mesure ou de variations de procédé non caractérisées situées entre la mesure du Step Height et la mesure après gravure de la grille.

1.5- Modélisation de la variabilité des dimensions des motifs après photolithographie NLDDGO2, PLDDGO2, NLDDGO1, PLDDGO1, NSD, PSD & PSDGO2

Les analyses de modélisation des variations des procédés du module STI ont montré (paragraphe II.1 du chapitre3) l'influence de la variabilité du Step Height sur les dimensions des motifs mesurés après les opérations de photolithographie du module grille ; entre 29% et 37% des variations des motifs de résine sont expliqués par des variations de Step Height. Les modèles statistiques établis dans le cadre de ce chapitre confirment que, dans la gamme de variabilité étudiée, le principal contributeur des variations des dimensions post photolithographie reste le Step Height.

1.6- Modélisation de la variabilité des dimensions des motifs après gravure offset

La Figure 113 représente la corrélation entre les dimensions de l'offset après la gravure et la largeur physique de la grille. Cette relation permet d'expliquer 60% des variations du CD Offset.

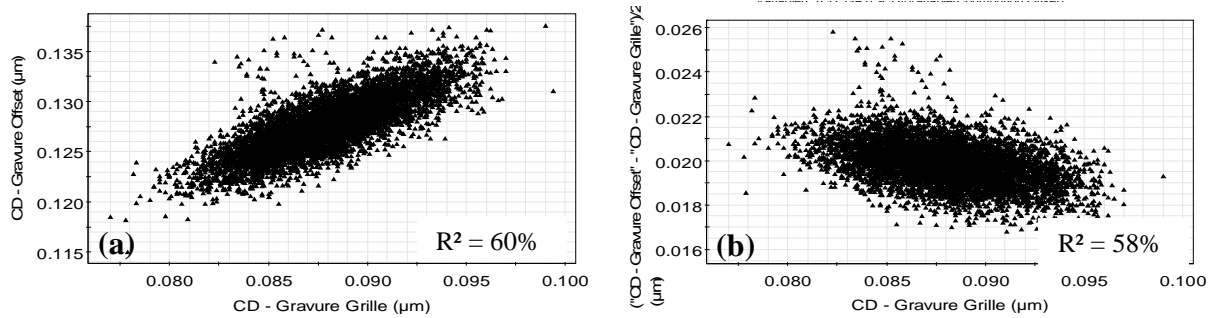


Figure 113. Influence des variations des dimensions de la grille sur la largeur de l'offset.
Largeur totale mesurée (a) et largeur réelle de l'offset (b).

La mesure réalisée après gravure offset prend en compte la totalité du motif c'est-à-dire la largeur de la grille + celle de l'offset. La Figure 113-b représente la contribution des variations des dimensions de la grille sur la largeur réelle de l'offset. Ces deux valeurs sont corrélées négativement. Cette relation quantifie l'influence du procédé de gravure grille sur les dimensions de l'offset.

1.7- Modélisation de la variabilité de l'épaisseur de TEOS mesurée après gravure offset

Les analyses montrent que 28% de la variabilité de l'épaisseur de TEOS après gravure offset est liée à la variabilité d'opérations précédentes (Tableau 18). Ce paramètre physique dépend des épaisseurs :

- De TEOS déposée lors de l'opération de dépôt TEOS offset. Le TEOS sert de couche d'arrêt lors de la gravure du nitrure de l'offset. Cette gravure étant sélective par rapport à l'oxyde, plus l'épaisseur de TEOS déposée est importante, plus l'épaisseur de TEOS après gravure est grande,
- Et d'oxyde au niveau des tranchées après la gravure grille. Cette épaisseur d'oxyde influence, par l'intermédiaire du Step Height, la mesure de l'endpoint lors de la gravure de l'offset.

1.8- Modélisation de la variabilité de l'épaisseur de nitrure après dépôt nitrure spacer

Contrairement aux dépôts LEPCVD effectués lors de l'élaboration de la grille ou des offset, le dépôt nitrure spacer est contrôlé en mesurant les plaques de production. Cette mesure permet de quantifier l'impact des variations des autres procédés sur les performances de ce dépôt. Les analyses statistiques montrent qu'un faible pourcentage de la variabilité (8%) du dépôt nitrure spacer est corrélé à l'épaisseur de TEOS mesurée après la gravure offset.

1.9- Modélisation de la variabilité des dimensions des motifs après gravure spacer

La Figure 114 représente les corrélations entre les dimensions des motifs obtenus après la gravure spacer et les principales mesures physiques corrélées (corrélations de l'ordre de 50%).

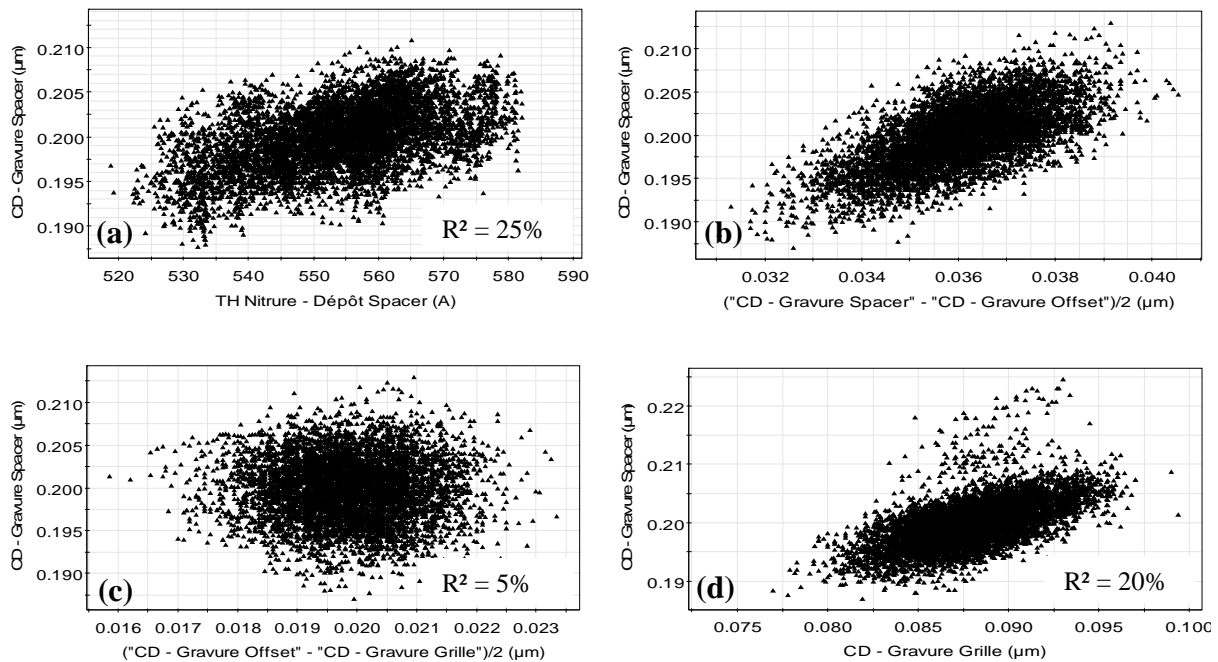


Figure 114. Impact des variations des mesures physiques du module grille sur les dimensions du spacer.
(Corrélation avec l'épaisseur de nitrure spacer déposée (a), les dimensions effectives du spacer (b), de l'offset (c) et de la grille (d)).

La mesure des dimensions du spacer est la somme des dimensions de la grille, de l'offset et du spacer. Par conséquent, la dimension finale du spacer dépend également des opérations de fabrication de la grille et de l'offset. La Figure 114 quantifie la contribution des dimensions réelles du spacer (b) ainsi que de la grille (d); La contribution du CD offset réel reste très faible (c). Ainsi, la variabilité des dimensions des motifs mesurés après la gravure spacer peut donc être attribuée :

- A la contribution du spacer lui-même. Plus l'épaisseur de nitrure déposée lors de l'opération dépôt nitrure spacer est importante, plus la valeur du CD spacer finale est grande car plus de matériau doit être gravé,
- A la variabilité de la largeur de la grille.

1.10- Modélisation de la variabilité de l'épaisseur de TEOS mesurée après gravure spacer

Les analyses de corrélations multivariées démontrent que près de 25% de la variance de l'épaisseur de TEOS mesurée après gravure spacer est corrélée à des variations de procédés antérieurs ; Le principal contributeur étant l'épaisseur d'oxyde au niveau des tranchées après gravure grille (Tableau 18). Comme nous l'avons décrit pour la gravure offset, l'épaisseur d'oxyde dans les tranchées influence, par l'intermédiaire du Step Height, la mesure de l'endpoint lors de la gravure du spacer.

1.11- Modélisation de la variabilité de l'épaisseur de TEOS mesurée après gravure Si-protect

La Figure 115 décrit la corrélation entre l'épaisseur de TEOS mesurée après gravure Si Protect et celle mesurée après gravure spacer. Ainsi, 29% de la variabilité constatée sur les mesures d'épaisseur de TEOS après gravure Si Protect est attribuée aux variations d'épaisseur de TEOS après gravure spacer.

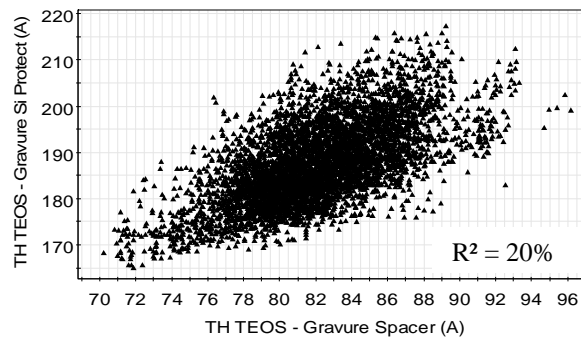


Figure 115. Corrélation entre les épaisseurs de TEOS restants après gravure Si Protect et Spacer.

L'épaisseur de TEOS mesurée après gravure Si Protect représente l'épaisseur accumulée lors des différents dépôts et modérée par les gravures Offset, Spacer et Si Protect. Ainsi une valeur importante d'épaisseur mesurée après gravure Offset implique une forte épaisseur après gravure Si Protect.

II- Validation physique des résultats statistiques entre les mesures physiques et électriques

La signification physique de chacune des corrélations statistiques identifiées dans le chapitre 3 paragraphe II est discutée dans ce paragraphe.

II.1- Dimensions électriques de la grille

La Figure 116 quantifie la relation entre les largeurs électriques et physiques de la grille. Les résultats des analyses statistiques indiquent que 57 % des variations des dimensions électriques de la grille sont dues à la variabilité de sa largeur physique.

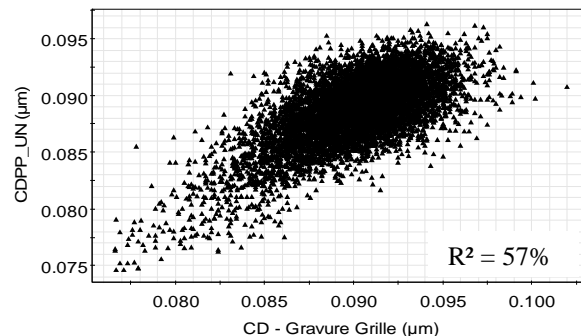


Figure 116. Corrélation entre les largeurs physiques et électriques de la grille.

Dans le chapitre 2 paragraphe II, nous avons montré que près de 15% des variations de la largeur électrique de la grille sont corrélées aux variations de Step Height. Par conséquent,

l'ensemble des analyses indique que 72% (57% + 15%) de la variabilité associée à cette dimension électrique sont expliquées par des variations de mesures physiques. Le pourcentage de variance non expliqué est attribué aux erreurs sur les mesures physiques et électriques ainsi qu'aux différences entre les deux structures de test utilisées pour le calcul du paramètre CDPP_UN (Chapitre 2 paragraphe III).

II.2- Mesure électrique de l'épaisseur d'oxyde

La Figure 117 présente le schéma de principe des structures utilisées pour la mesure électrique de l'épaisseur d'oxyde.

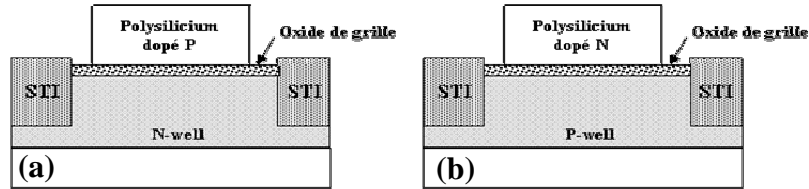


Figure 117. Schéma des structures TP1PNW (a) et TP1NPW (b).

La mesure de l'épaisseur d'oxyde est effectuée en régime d'accumulation (tension de grille positive pour le paramètre TP1PNW et négative pour TP1NPW). En régime d'accumulation, la tension de grille est telle que les porteurs majoritaires du substrat s'accumulent à l'interface oxyde / semiconducteur jusqu'à rendre la capacité du substrat très grande.

Les charges se situent donc uniquement de part et d'autre de l'oxyde si bien que la capacité totale est simplement la capacité de l'oxyde C_{OX} . On peut alors en déduire l'épaisseur d'oxyde t_{OX} équivalente :

$$t_{OX} = \frac{\epsilon_{OX} \cdot A}{C_{OX}} \quad \text{avec } \epsilon_{OX} : \text{constante diélectrique de l'oxyde,}$$

$A : \text{surface de l'oxyde (3600}\mu\text{m}^2\text{).}$

Les analyses multivariées démontrent que respectivement 47% et 56% des variations des paramètres TP1NPW et TP1PNW sont corrélées à des variations de mesures physiques et notamment à la variabilité de l'épaisseur d'oxyde GO1 (Figure 118).

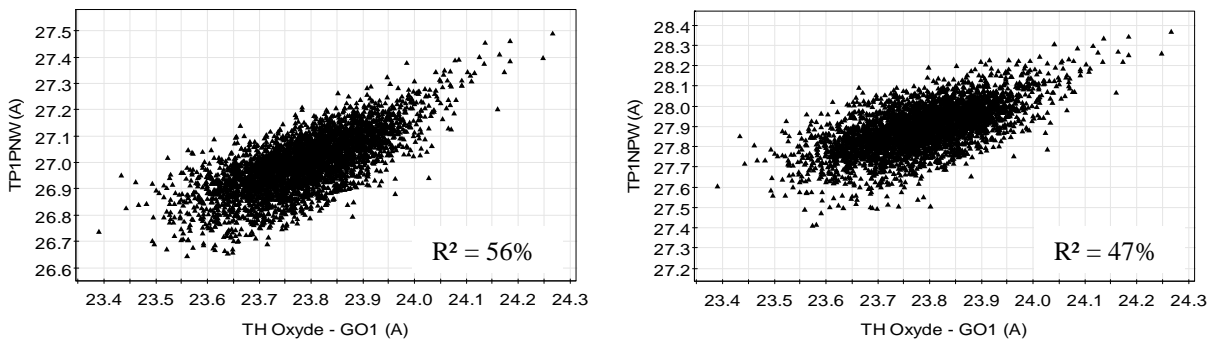


Figure 118. Corrélations entre les épaisseurs physique et électrique de l'oxyde GO1.

Le taux de corrélation entre la mesure physique et les mesures électriques montrent que près de la moitié des variations des paramètres électriques n'est pas expliquée par les mesures physiques. Ce pourcentage de corrélation non expliqué peut provenir :

- Des conditions d'implantation des caissons NWell et PWell,
- Des variations de surface de l'oxyde (paramètre non mesuré),
- Des erreurs sur les mesures électriques et physiques.

II.3- Courants de fuite des jonctions P/N+ et N/P+

Les mesures électriques effectuées sur les structures silicurrées et non silicurrées de type IxFING, IxPOLY (avec x = N ou P selon le dopage) mesurent le courant de fuite des diodes N+/PWell ou P+/NWell. La Figure 119 présente une vue schématique de la structure INFING (diode N+ sur PWell) entre deux tranchées d'isolation.

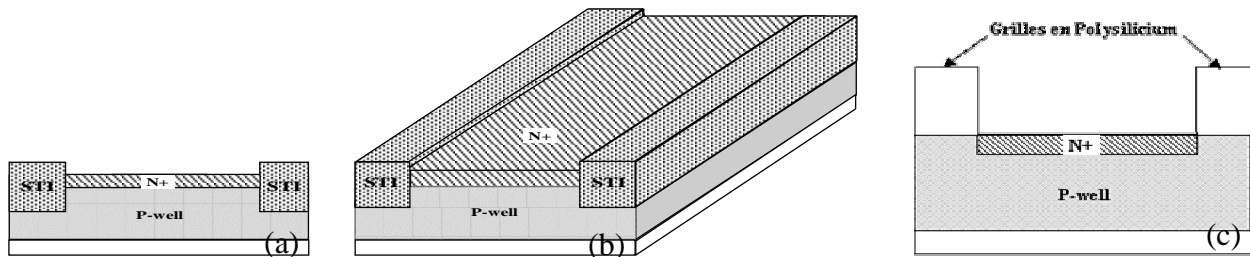


Figure 119. Représentation des structures INFING (diode N+/Pwell) et INPOLY.
INFING : Vue de face (a) et en perspective (b) + INPOLY (c).

Selon le type de dopage effectué et l'environnement de la diode, on distingue 4 structures différentes (chacune de ces mesures est réalisée sur des structures silicurrées et non silicurrées) :

- INFING : Diode N+/PWell entre deux tranchées d'isolation,
- INPOLY : Diode N+/PWell entre deux lignes de polysilicium,
- IPFING : Diode P+/NWell entre deux tranchées d'isolation,
- IPPOLY : Diode P+/NWell entre deux lignes de polysilicium.

Les modélisations multivariées quantifient une influence de la dimension physique de la grille sur les paramètres IxFING. Ces relations statistiques ne trouvent pas de signification physique directe dans le sens où ces structures de test ne comportent pas de grille. En fait cette relation est purement indirecte. Dans le chapitre II, les analyses statistiques ont quantifié l'impact du Step Height sur les étapes de photolithographie grille et pré-implantation ; L'influence du Step Height sur ces opérations étant similaire. Les paramètres IxFING sont corrélés directement à certains procédés de photolithographie pré-implantation et par conséquent indirectement à l'étape de photolithographie grille (et donc au paramètre CD - Gravure Grille). L'analyse de la variabilité de la mesure électrique INFING montre une forte corrélation avec l'épaisseur de TEOS après

gravure spacer. Cependant, cette relation n'existe pas pour la structure IPFING (Figure 120-b). Si considère seulement le cas de la diode N+/PWell, plus l'épaisseur de TEOS est grande, plus la profondeur de jonction est proche de la surface et par conséquent plus le courant de fuite est important.

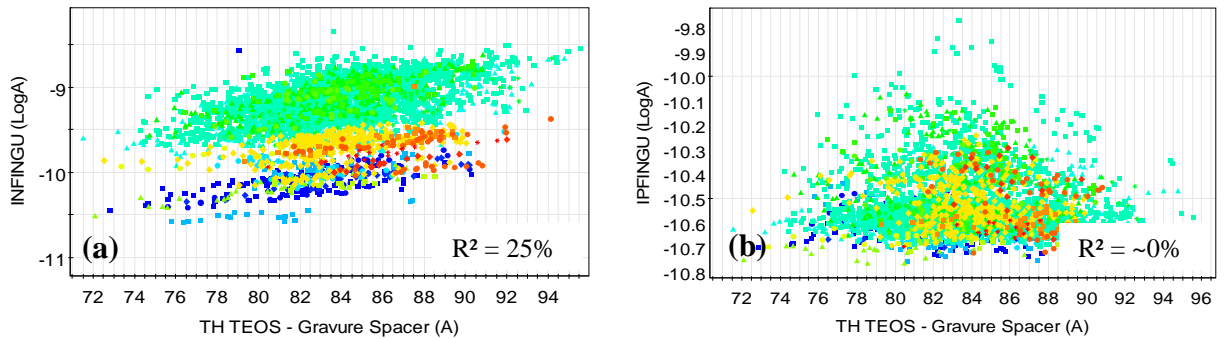


Figure 120. Influence de l'épaisseur de TEOS après gravure spacer sur les courant de fuite INFINGU & IPFINGU.

Les observations précédentes mettent en évidence que le dopage N+ est beaucoup plus sensible que le dopage P+ : à épaisseur de TEOS constant, la profondeur de jonction est plus faible pour le dopage N+. La Figure 120-a souligne également un effet de décalage entre les produits. Ce décalage provient des conditions d'implantation particulière en fonction des produits.

La Figure 121 s'intéresse à l'analyse de la variabilité des paramètres de type IxPOLY (X = N ou P). Tout comme pour l'analyse précédente, on constate un fort effet produit provenant d'un changement volontaire des conditions d'implantation.

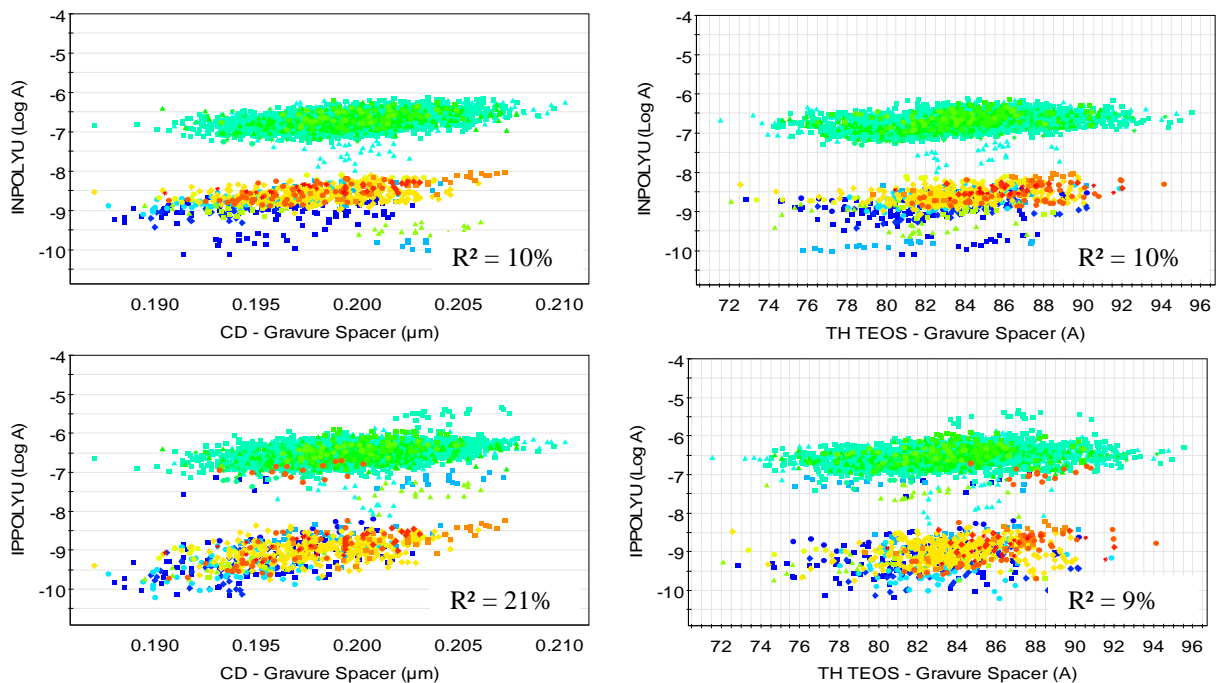


Figure 121. Influence de l'épaisseur de TEOS et de la largeur des motifs mesurés après gravure spacer sur les courant de fuite de jonction des structures INPOLY et IPPOLYU.

Les graphiques ci-dessus indiquent toujours une forte corrélation entre l'épaisseur de TEOS après gravure spacer et les mesures électriques de type INPOLY.

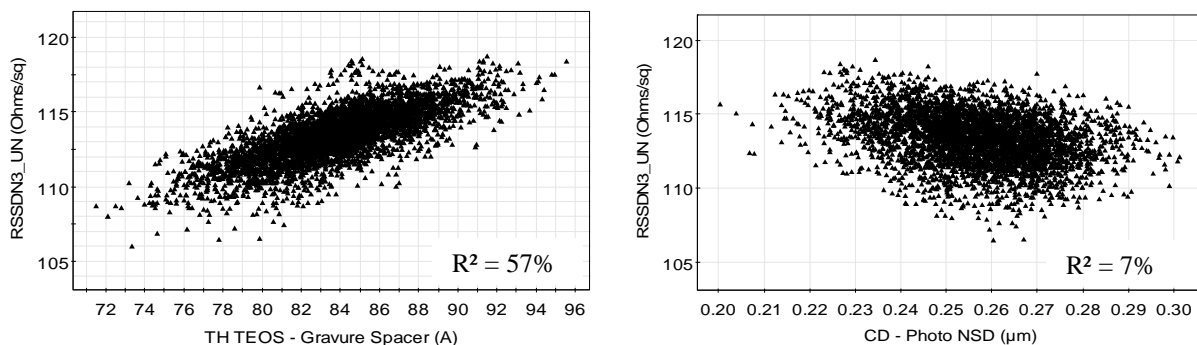
De plus, la variabilité des dimensions des motifs après gravure spacer influe sur les variations de courant de fuite des deux types de diodes. Ainsi, plus cette dimension physique est importante, plus la largeur de la zone dopée est faible et par conséquent, plus les courants de fuite sont importants.

II.4- Résistances mesurées sur les zones actives

Dans le chapitre III, les analyses de corrélation entre les mesures de résistance de type RSSDx11 et RSSDx1114 ($x=N$ ou P selon le dopage des résistances) ont respectivement indiquée que 50% et 40 % de leur variabilité est expliquée par des variations des mesures physiques du module d'isolation. Dans ce paragraphe, on se propose d'étudier l'influence de la variabilité induite par le module grille sur ces mesures électriques. Nous considérerons également les deux mesures de résistance RSSDN3 et RSSDP3, effectuées sur des motifs de largeur W plus importante (influence négligeable de la largeur des zones actives). Les résultats des corrélations multivariées (Tableau 19) montrent que :

- 14% et 29% des variations des paramètres RSSDN11 et RSSDP11 sont corrélés aux variations d'épaisseur de TEOS après gravure spacer,
- 14% et 20% de la variabilité des paramètres RSSDN1114 et RSSDP1114 est expliquée également par des variations d'épaisseur de TEOS après gravure spacer,
- 65% et 32% des variations des paramètres RSSDN3 et RSSDP3 sont expliqués par des variations d'épaisseur de TEOS après gravure spacer et des dimensions des motifs après les opérations de photolithographie NSD et PSD.

La Figure 122 présente les corrélations mises en évidence en les mesures physiques et les résultats électriques obtenus sur les structures RSSDx3 (les modélisations des résistances non silicurées sont de meilleure qualité car elles ne prennent pas en compte la variabilité due à la silicuration).



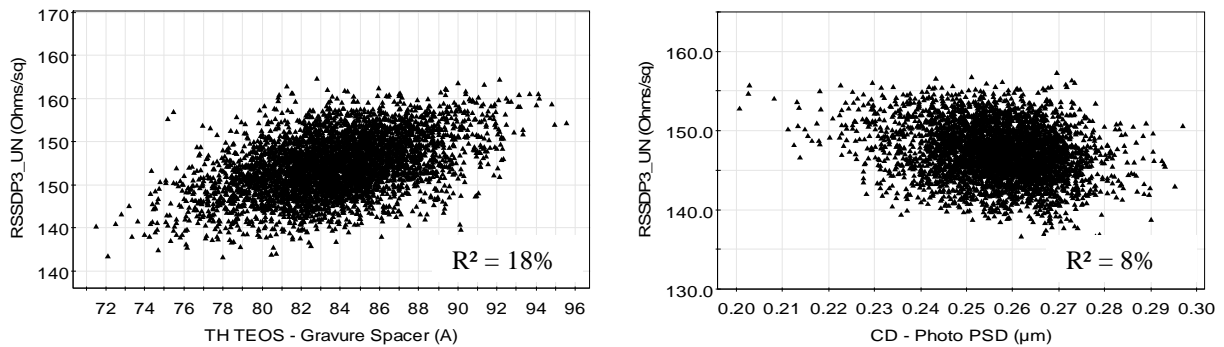


Figure 122. Influence de l'épaisseur de TEOS après gravure Spacer et des dimensions des motifs après photolithographie NSD et PSD sur les mesures de résistance de type RSSDx3_UN.

Nous retrouvons l'épaisseur de TEOS après gravure spacer qui influe sur la profondeur de jonction des implantations et par conséquent sur la valeur des résistances mesurées ; plus la profondeur de jonction est faible, plus la résistance de vient élevée. Nous constatons également une meilleure corrélation pour la résistance RSSDN3 montrant ainsi que les implantation de type N+ sont plus influencées par des variations d'épaisseur de TEOS.

De plus, la variation des dimensions des motifs après implantation NSD et PSD joue un rôle sur la variabilité des mesures de résistances. Ainsi plus ces dimensions sont importantes, plus la zone dopée est grande et par conséquent, plus la résistance mesurée est faible.

L'ensemble des analyses sur les mesures de résistances de zones actives dopées effectuées dans le cadre des chapitres III et IV démontrent que :

- 75% des variations des résistances du type RSSDx11 (x=N ou P) sont corrélées aux variations des mesures physiques des modules STI et Grille,
- 65% des variations des résistances du type RSSDx11114 sont corrélées aux variations des mesures physiques des modules STI et Grille,
- 65% des variations des résistances du type RSSDx3 sont corrélées aux variations des mesures physiques des modules STI et Grille.

Le pourcentage de corrélation non expliqué pouvant provenir directement des conditions d'implantation ou de recuit.

II.5- Résistances mesurées sur les barrettes de poly-silicium

Contrairement aux résistances de type RSSDxxx, les résistances de type RSPxxx sont mesurées sur des lignes de polysilicium dopées. Les modélisations montrent que ces résistances dépendent également de l'épaisseur de TEOS après gravure spacer et des dimensions des motifs après photolithographie source-drain. La Figure 123 présente les résultats pour des lignes de polysilicium dopées P.

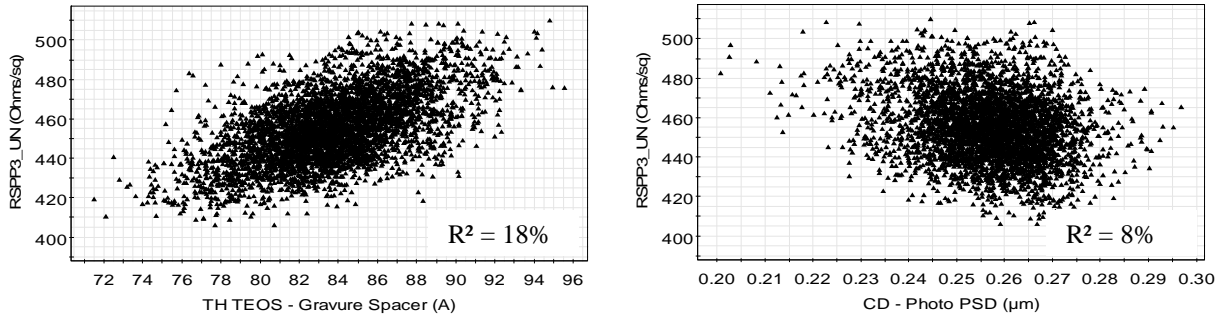


Figure 123. Corrélations entre la mesure de résistance RSPP3_UN et l'épaisseur d'oxyde TEOS après gravure spacer et la dimension des motifs après photolithographie PSD.

II.6- Caractéristiques électriques des transistors de type NMOS

La Figure 124 présente le schéma de principe d'un transistor NMOS conventionnel. Les caractéristiques du transistor dépendent principalement de la longueur électrique du canal

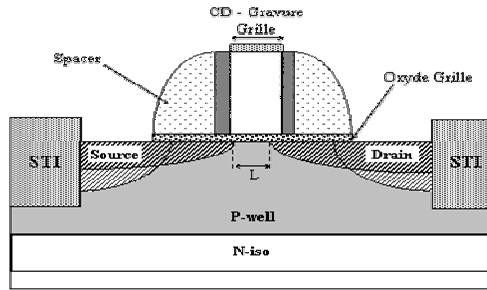


Figure 124. Schéma de principe d'un transistor NMOS conventionnel.

Le fonctionnement d'un transistor est caractérisé principalement par trois types de mesures :

- La mesure de la tension de seuil V_{th} : tension nécessaire au passage de l'état Off à l'état On :

$$V_{th} = V_{FB} + \frac{Q_{dep}}{C_{OX}} + 2 \cdot \phi_F$$

avec : $Q_{dep} = q \cdot N_B \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_{si}}{q \cdot N_B} (\phi_s - V_{BS})}$

V_{FB} : Φ_{ms} pour une technologie bien maîtrisée,

q : Charge de l'électron,

ϵ_{si} : Permittivité relative du silicium,

N_B : Dopage volumique du substrat,

Φ_s : Potentiel de surface,

V_{BS} : Tension appliquée au substrat.

- La mesure des courants de fuite entre la source et le drain à l'état Off (transistor bloquant) :

$$\log(I_{off}) = \log(I_{th}) - \frac{V_{th}}{S}$$

avec $I_{th} \approx 10^{-7} \cdot \frac{W}{L}$,

S : Pente sous le seuil,

W : Largeur des zones actives (CD - gravure active),

L : Largeur de la grille (CD – Gravure Grille)

- La mesure des courants de saturation entre la source et le drain à l'état à l'état On (transistor passant). Par approximation, on définit :

$$I_{DS} = \frac{1}{2} \mu_e \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L} (V_G - V_{th})^2$$

Avec μ_e : Mobilité des électrons,

C_{OX} : Capacité de l'oxyde,

V_G : Tension appliquée à la grille

Le chapitre précédent a permis de quantifier l'impact des variations de W et du Step Height sur les principales caractéristiques des transistors. Les résultats présentés dans le Tableau 19 montrent l'impact des opérations du module grille sur la variabilité de ces mesures électriques (Figure 125).

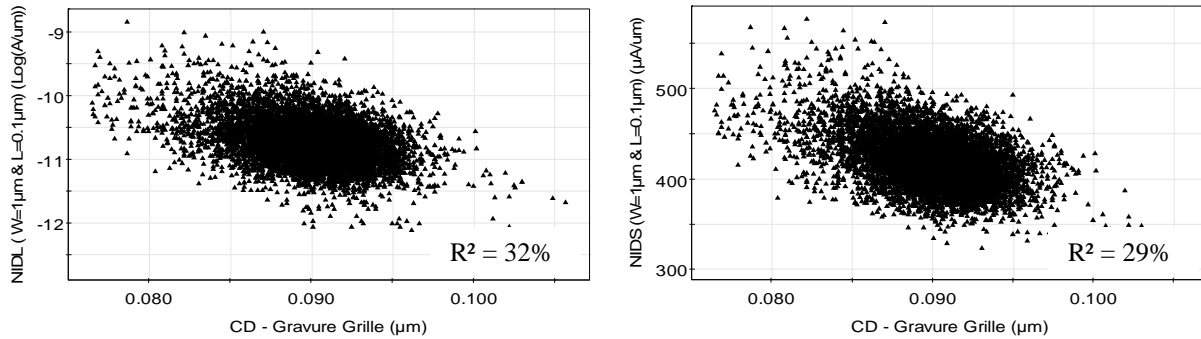


Figure 125. Influence des dimensions de la grille sur les principales caractéristiques des transistors.

Ainsi pour des dimensions nominales (W=1µm & L=0.1µm) :

- Les courants à l'état On ainsi qu'à l'état Off varient de façon inverse avec le paramètre « CD - Gravure Grille ».
- La tension de seuil diminue lorsque le paramètre « CD - Gravure Grille » augmente. Cette relation met en évidence les phénomènes de canaux courts et DIBL (Drain Induced Barrier Lowering - Abaissement de la barrière de potentielle du canal par la tension de drain).

Les analyses de modélisation multivariées des mesures physiques des modules d'isolation et de la grille permettent de comprendre :

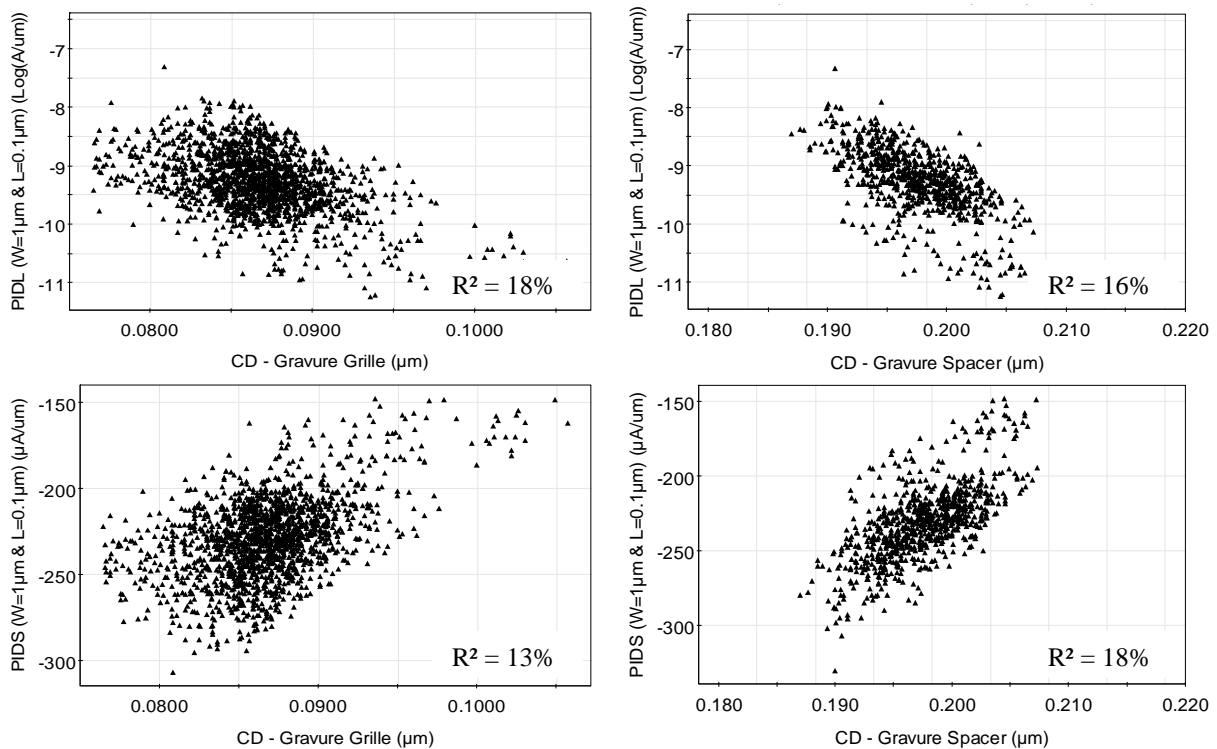
- 40% des variations du courant de fuite,

- 40% des variations du courant à l'état On en régime saturé,
- 20% des variations de la tension de seuil.

Les variations des caractéristiques électriques des transistors de dimensions $W=0.12\mu\text{m}$ et $L=0.1\mu\text{m}$ sont logiquement beaucoup moins impactés par les variations des opérations du module grille ; Le principal contributeur de cette variabilité étant la largeur des zones actives.

II.7- Caractéristiques des transistors de type PMOS

Les analyses multivariées effectuées sur les transistors PMOS d'expliquent entre 12% et 31% de la variabilité des mesures électriques (Tableau 19). Comme précédemment, les dimensions de la grille influent grandement sur les performances électriques et particulièrement sur les courants à l'état Off et à l'état On. Cependant, pour les transistors PMOS, les dimensions du spacer apparaissent comme le principal contributeur ; Plus les dimensions du spacer sont importantes, plus la largeur électrique de la grille est grande (après diffusion des dopants) et par conséquent, plus le courant de saturation augmente (Figure 126).



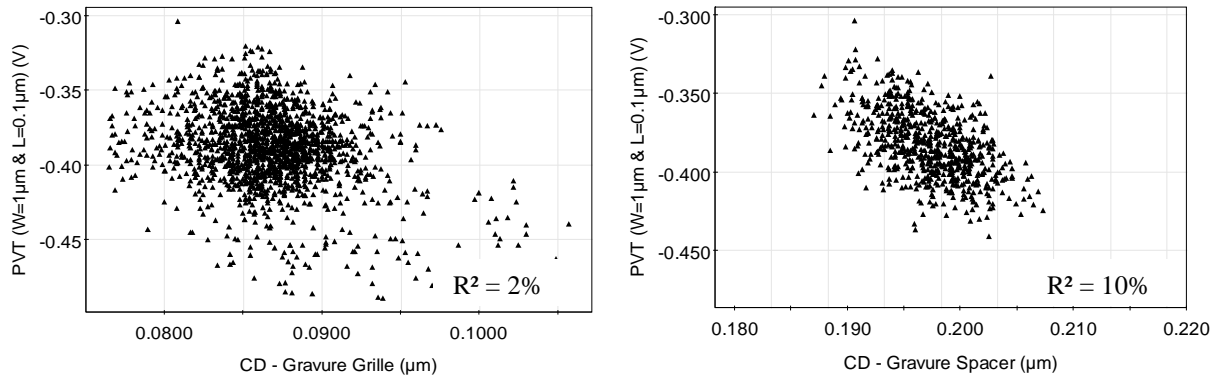


Figure 126. Variations des mesures électriques des transistors en fonction des dimensions de la grille et du spacer.

La diffusion latérale des dopants pour les transistors PMOS est très influencée par les dimensions du CD spacer contrairement à celle des transistors NMOS ; L'hypothèse émise pour expliquer ce phénomène est que la diffusion latérale des dopants pour les transistors NMOS est principalement guidée par les étapes d'implantation et de recuit thermique.

Annexe 13. Etude détaillée de l'ensemble des corrélations entre les mesures physiques & électriques du module métal 2.

I- Validation physique des relations entre les mesures physiques

Lors de la modélisation du module STI, les analyses ont mis en évidence des relations de topographie. Les résultats présentés ci-dessus mettent en jeu le même type de relation.

I.1- Modélisation de la variabilité des dimensions du masque dur TiN après gravure

L'analyse des variations des dimensions des motifs après la gravure du masque dur montre que seulement 10% de cette variabilité est due aux variations des dimensions des motifs obtenus après photolithographie ligne (Figure 127).

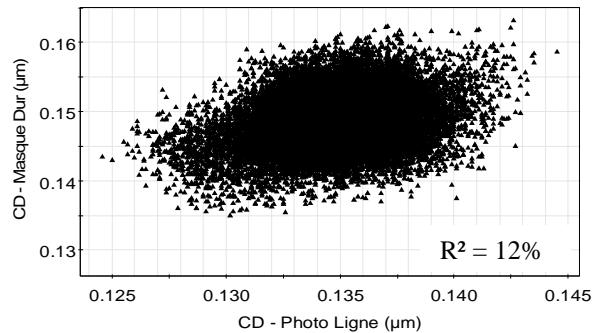


Figure 127. Impact des variations du CD photo ligne sur la dimension des motifs après gravure du masque dur.

Cette relation illustre le phénomène suivant : plus la dimension des motifs après photolithographie est importante plus la dimension des zones de TiN gravées est grande. Nous noterons également que les motifs de TiN gravés sont plus grands que les motifs de résine.

I.2- Modélisation de la variabilité des dimensions des motifs après la gravure via

Les résultats de modélisation de la variabilité des mesures du paramètre CD - gravure via obtenus souligne le même phénomène que celui mis en évidence lors des analyses des variations du paramètre CD - masque dur à savoir l'influence des dimensions des motifs après photolithographie sur les résultats après gravure.

I.3- Modélisation de la variabilité des dimensions des lignes après la gravure ligne

La Figure 128 regroupe les représentations univariées exposant les relations entre la dimension des motifs après gravure ligne et les mesures effectuées après gravure du masque dur et après l'opération de photolithographie des lignes. Ces deux relations permettent d'expliquer près de 51% des variations du paramètre CD - gravure ligne.

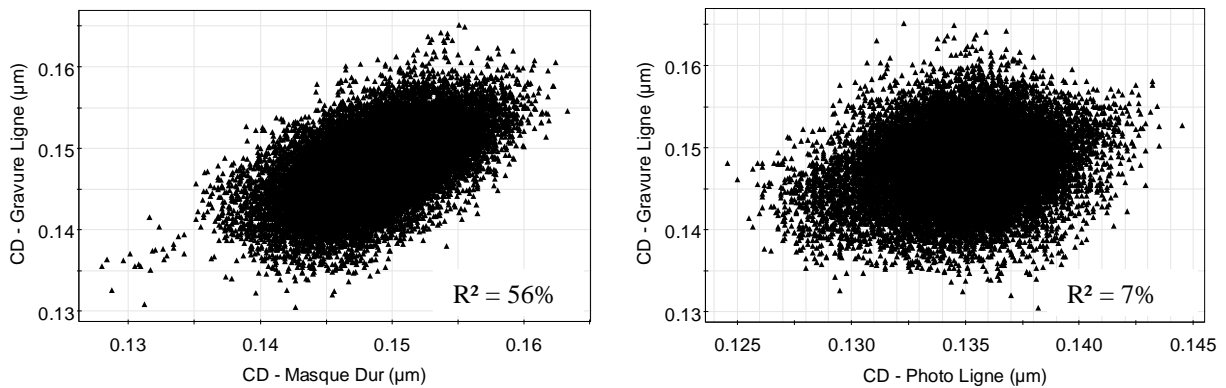


Figure 128. Impact des variations des dimensions après la gravure du masque dur et la photolithographie ligne sur les dimensions des motifs après gravure ligne.

Le masque dur définit l'architecture des lignes dans l'élaboration des interconnexions par la technique « dual damascène ». La Figure 128-a montre une grande influence de l'opération de gravure du masque dur sur les résultats obtenus après gravure ligne : plus les dimensions des motifs de TiN sont grandes après gravure du masque dur, plus la largeur des lignes est importante.

La Figure 128-b montre l'influence indirecte entre les dimensions des motifs après gravure et photolithographie ligne. La photolithographie ligne influe sur les résultats après gravure du masque dur. Cette dernière opération impacte, comme décrit précédemment, la largeur finale des lignes.

1.4- Modélisation de la variabilité de l'épaisseur de SiOC après la gravure ligne

Les analyses multivariées indiquent que 51% de la variabilité des mesures d'épaisseur de SiOC après la gravure ligne est induite par les variations de l'opération de dépôt SiOC (Figure 129).

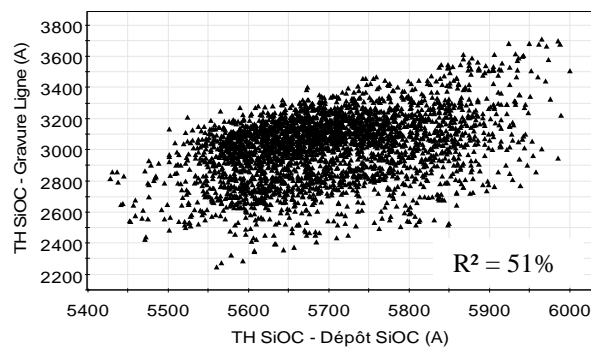


Figure 129. Corrélation entre les épaisseurs de SiOC après dépôt et après gravure ligne.

Le procédé de gravure des lignes étant en temps fixe, plus l'épaisseur déposée est importante, plus l'épaisseur après gravure est grande.

I.5- Modélisation de la variabilité de l'épaisseur de SiOC après polissage

Le paramètre TH SiOC - CMP L2 représente l'épaisseur de diélectrique SiOC en haut des lignes. Les analyses montrent que respectivement 20% et 10% des variations de cette mesure peuvent être attribuées aux variabilités des opérations de dépôt SiOC et gravure Ligne.

Remarque : le paramètre « TH SiOC - CMP Cu L2 » après polissage prend en compte la somme des épaisseurs de SiOC et de TEOS déposées.

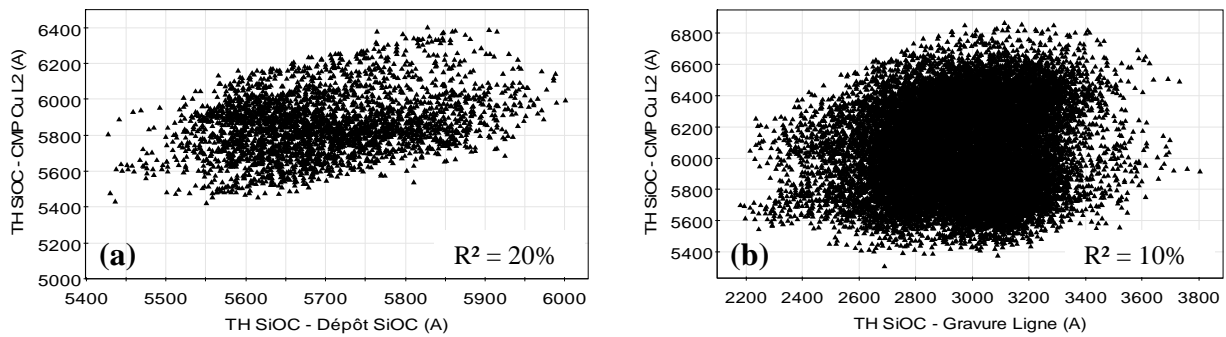


Figure 130. Influence de la variabilité des épaisseurs de SiOC après dépôt SiOC et après gravure ligne sur l'épaisseur de SiOC après CMP.

Le polissage du SiOC se réalise en temps fixe (plateau 3 de l'équipement de CMP). L'épaisseur enlevée lors du polissage ne dépend donc pas du dépôt. Ainsi plus l'épaisseur déposée est grande, plus celle mesurée sera importante.

La Figure 129 a montré l'influence du dépôt SiOC sur la gravure ligne (51% de corrélation). Précédemment nous avons quantifié la relation en le dépôt SiOC et le polissage (20% de corrélation). La Figure 130-b reflète ces deux relations ($51\% * 20\% = 10\%$).

I.6- Modélisation de la variabilité du Step Height après polissage mécanico-chimique

Le Step Height du cuivre caractérise le phénomène de dishing du cuivre. Le dishing du cuivre, essentiellement due au procédé de polissage mécanico-chimique, mesure la différence de hauteur de cuivre entre le centre de la ligne de cuivre et le bord.

La Figure 131 représente la corrélation (de l'ordre de 33%) entre le dishing et l'épaisseur de SiOC après polissage.

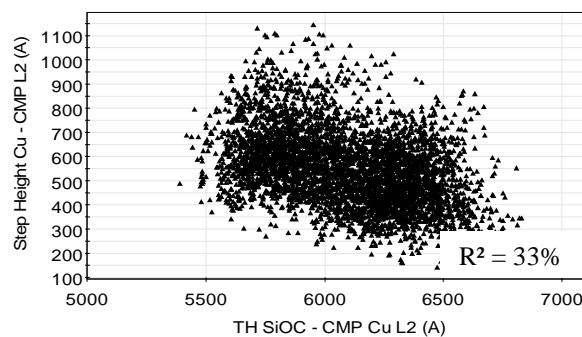


Figure 131. Corrélation entre les épaisseurs de SiOC et de Step Height Cu après polissage mécanico-chimique.

Cette corrélation montre que le Step Height du cuivre varie est corrélée négativement avec l'épaisseur de SiOC après polissage. Cependant l'origine de la variabilité du paramètre « Step Height Cu - CMP L2 » n'a pas les mêmes origines que la variabilité de l'épaisseur de SiOC après polissage (Aucune corrélation entre le dishing du cuivre et les épaisseur de SiOC après dépôt et gravure ligne). Dans le paragraphe V.4.f-, nous chercherons de comprendre l'origine de cette variabilité à l'aide des paramètres de l'équipement de CMP.

Les modèles statistiques multivariés obtenus lors de la modélisation des relations entre les mesures physique du module Metal 2 ont notamment permis de quantifier l'origine des sources de variances des procédés de polissage mécano-chimique et de gravure (ligne et via). Le paragraphe suivant propose de quantifier l'impact de la variance des mesures physiques sur les performances électriques des interconnexions du niveau métal 2.

II- Validation physique des relations statistiques obtenues

II.1- Résistance des lignes de métal

Les mesures de résistance des lignes de métal constituent les principaux tests électriques de caractérisation des interconnexions. Les études de modélisations statistiques effectuées sont focalisées sur 2 types de structure :

- RLM2SLD : la mesure de résistance est réalisée sur des structures en serpent (Figure 132).

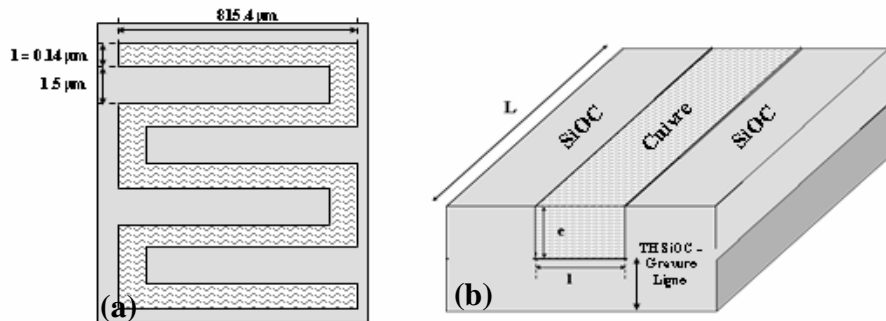


Figure 132. Structure de test RLM2SLD.

Vue de dessus (a) et représentation en coupe (b)

La valeur du paramètre est exprimée en ohm/(unité de longueur) et est définie par :

$$RLM2SLD = \frac{R_{Mesuré}}{L}$$

- RSM220D : la résistance est mesurée sur un barreau de cuivre comportant 2 sections différentes (Figure 133). La valeur de la résistance RSM220D est mesurée seulement au niveau du grand barreau de cuivre (motif 1).

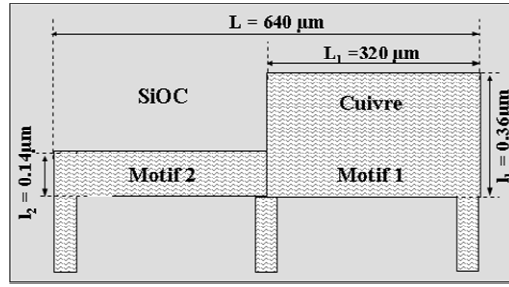


Figure 133. Vue de dessus de la structure de test RSM220D.

Le paramètre RSM220D s'exprime en ohm/sq. Sa valeur est définie par :

$$RSM\ 220D = R_{Mesuré} \cdot \frac{e}{L} \quad (e : \text{épaisseur du motif})$$

Le premier barreau de cuivre (motif 1), beaucoup plus fin que le premier est très sensible aux variations de l. La mesure de résistance de ce motif permet d'en déduire la valeur électrique de la largeur du motif 2 :

$$l_2 = \frac{RSM\ 220D}{R_2} \cdot l_1 \quad \text{avec } R_2 : \text{Résistance mesurée du motif 2}$$

Le début de ce paragraphe s'intéresse à la validation physique des résultats des analyses de corrélation obtenus pour les structures de type RLM2SLD. La dernière partie de ce paragraphe est focalisée sur la compréhension de la variance des mesures effectuées sur les structures de type RSM220D.

RLM2SLD :

La Figure 134 présente l'influence de l'épaisseur de SiOC après la gravure des lignes sur la résistance RLM2SLD. Cette relation explique près de 65 % de la variabilité du paramètre électrique.

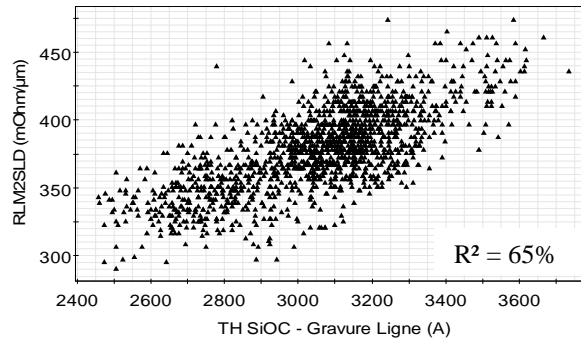


Figure 134. Influence de l'épaisseur de SiOC après gravure ligne sur la résistance des lignes de métal.

La résistance des lignes de cuivre est défini par :

$$R = \rho \cdot \frac{L}{l \cdot e}$$

Le polissage des lignes de cuivre (plateaux 1 & 2 de l'équipement de CMP) utilisant un système d'endpoint, le procédé s'arrête lorsque le polissage débouche sur la barrière de Ta. Ainsi lorsque l'épaisseur de SiOC après gravure ligne (TH SiOC - Gravure ligne) augmente, alors la valeur de « e » diminue, augmentant en conséquence la valeur de la résistance de la ligne.

RSM220D :

La Figure 135 illustre l'influence de l'épaisseur de SiOC mesurée après gravure ligne et polissage mécano-chimique sur la valeur de la résistance RSM220D (69% de la variabilité du paramètre RSM220D est expliquée).

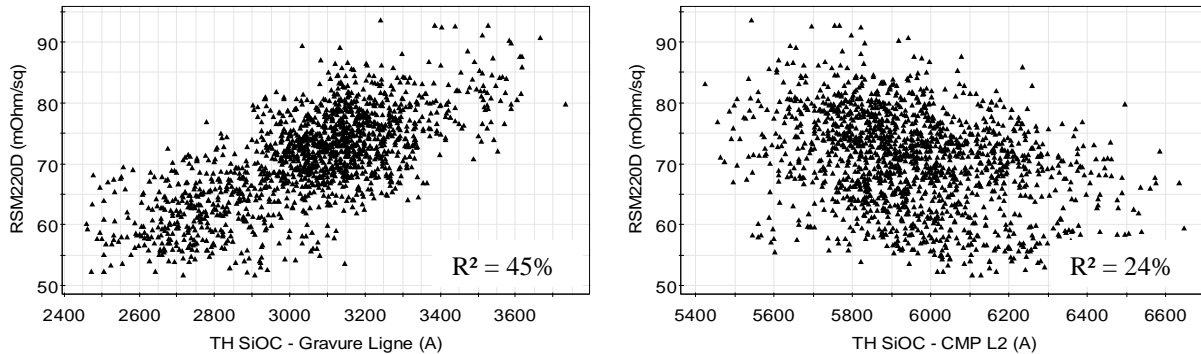


Figure 135. Corrélation entre la mesure électrique RSM220D et les épaisseurs de SiOC mesurées après gravure ligne et après CMP.

La relation obtenue entre l'épaisseur de SiOC après gravure ligne et la résistance RSM220D rejoint ce qui a été montré lors de l'analyse de la variabilité du paramètre RLM2SLD ; La valeur de résistance augmente avec l'épaisseur de SiOC.

Les analyses statistiques montrent que la résistance RSM220D est plus sensible au procédé de polissage mécano-chimique que la résistance RLM2SLD. En effet, la surface du motif de mesure du paramètre RSM220D étant beaucoup plus importante que pour le paramètre RLM2SLD, l'épaisseur « e » de la ligne de cuivre est plus sensible au procédé de polissage mécano-chimique. Ainsi, une épaisseur moins importante de SiOC après polissage implique une diminution de l'épaisseur « e » et par conséquent une augmentation de résistance.

L'analyse des variations du paramètre CDM220D, déduit de la mesure de RSM220D, montre que seulement 36% des variations sont expliquées par des variations de mesures physiques (contre 69% pour le paramètre RSM220D). La chute du coefficient de corrélation montre qu'une part de la variabilité de la mesure de CDM220D provient :

- De l'erreur commise lors de la mesure de R_1 ,
- Des variations de l_2 non prises en compte lors du calcul.

II.2- Mesures de capacité entre les lignes et déduction de l'épaisseur de SiOC équivalente

La mesure de la capacité (CIMD_x) entre les lignes de cuivre de deux niveaux consécutifs permet de caractériser le couplage capacitif entre ces motifs (Figure 136).

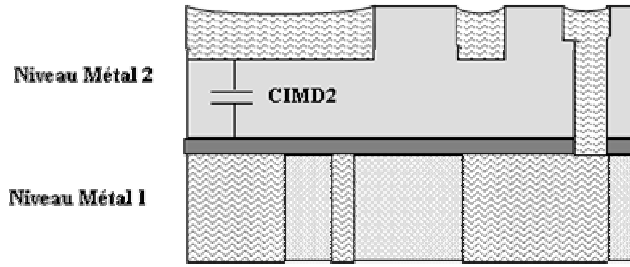


Figure 136. Structure de test mesurant la capacité entre les lignes 1 et 2.

Cette mesure permet également d'en déduire l'épaisseur d'oxyde SiOC équivalente :

$$CIMD_x = \frac{\epsilon_{SiOC} \cdot S}{TIMD_x}$$

avec $\epsilon_{SiOC} = 3.7$,

S = Surface de la ligne de cuivre.

Les analyses de modélisation ont permis de déterminer que respectivement 64% et 65% des variations de CIMD1 et TIMD1 sont corrélés à des variations de paramètres physiques mesurés lors du module d'interconnexion métal 2. La Figure 137 expose les principales relations déterminées pour le paramètre CIMD1.

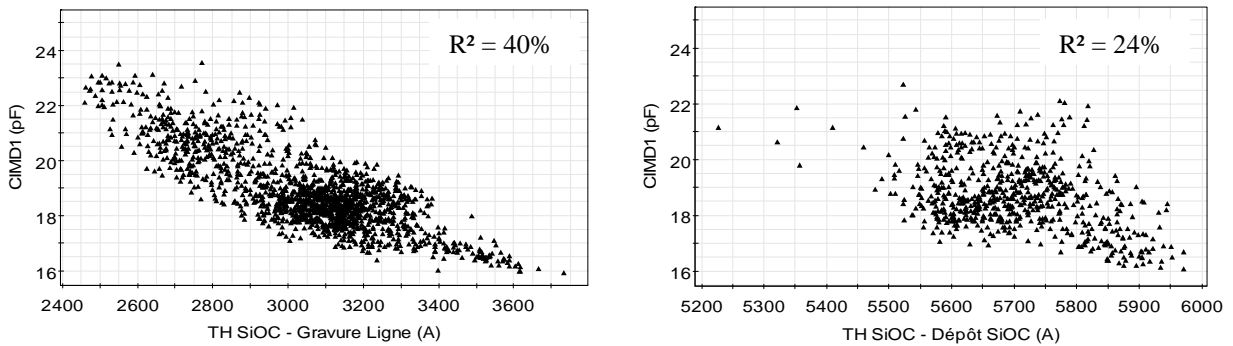


Figure 137. Relations entre le paramètre CIMD1 et les épaisseurs de SiOC après gravure ligne et après dépôt SiOC.

Ces relations montrent que l'épaisseur de SiOC après gravure ligne constitue la principale source de variation des paramètres CIMD1 et TIMD1. L'épaisseur électrique TIMD1 augmente logiquement avec l'épaisseur de SiOC mesurée après gravure ligne.

Comme cela a été démontré lors des analyses de corrélations entre les mesures physiques, une part de cette variabilité provient directement du dépôt SiOC.

II.3- Résistance des vias

Les mesures précédentes avaient pour objectif de caractériser les lignes de métal. Les paramètres électriques présentés dans les deux paragraphes suivant permettent de caractériser les performances des vias. Chacune des mesures effectuées testent plusieurs milliers de structure. Le résultats obtenu représente la valeur moyenne par via.

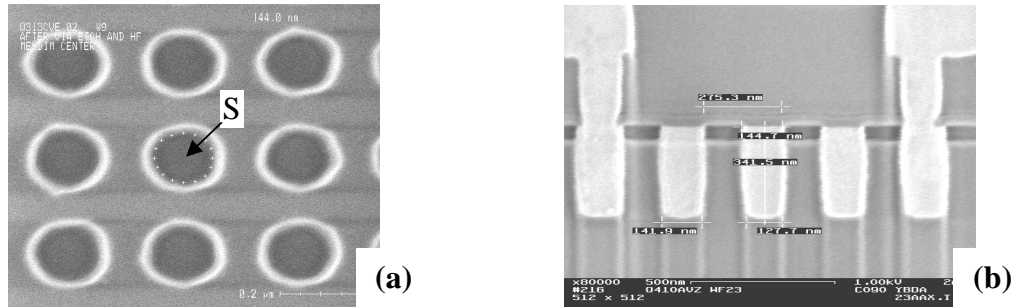


Figure 138. Vue SEM des chaînes de via.
Vue de dessus (a) et de face (b).

Les analyses statistiques montrent que, pour les différentes structures étudiées, environ 30% des variations de la résistance de via est corrélée à des variations de mesures physiques (Figure 139).

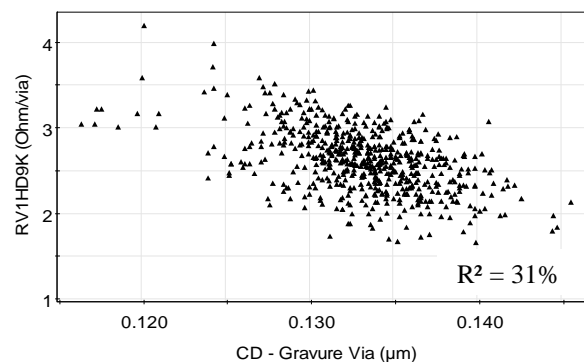


Figure 139. Variations des résistances des vias haute densité en fonction de la dimension des vias.

La dimension des vias apparaît comme le principal contributeur des variations des résistances de via. Si la surface S des vias diminue, notamment à cause d'une faible dimension de via, alors la résistance naturellement augmente.

