

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mentouri - Constantine
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département d'Electronique

MEMOIRE

PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME

DE MAGISTER EN ELECTRONIQUE

OPTION : MICROELECTRONIQUE

PRESENTE PAR :

KAGHOUCHE Bessem

INTITULE :

**ETUDE PAR TCAD-SILVACO D'UNE STRUCTURE MOS POUR
LA REALISATION DE CAPTEURS ISFET : PARAMETRES
TECHNOLOGIQUES ET ELECTRIQUES**

DEVANT LE JURY :

Président : **Mr. A. CHAABI**

Prof. Université de Constantine

Rapporteur : **Mme. F. MANSOUR**

Prof. Université de Constantine

Examineur : **Mr. A. BELLEL**

Prof. Université de Constantine

Examineur : **Mr. F. KERROUR**

M.C. Université de Constantine

Soutenu le : 17 Mai 2010

A mes parents

A mon frère et mes sœurs

A ma famille

A mes amis.

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au LEMEAMED (Laboratoire d'Etude des Matériaux Electroniques pour Application Médicales) à l'université de Constantine.

Je remercie tout particulièrement mon encadreur, Madame Mansour Farida, Professeur à l'université Mentouri de Constantine et directrice de laboratoire d'Etudes de Matériaux Electronique pour Applications Médicales qui a dirigé ce travail. Je lui suis extrêmement reconnaissant pour sa confiance, sa disponibilité, sa patience, son écoute attentive dans les inévitables périodes de doutes et aussi pour ses qualités humaines. Cette collaboration fut un réel plaisir et l'occasion pour moi d'apprendre énormément de choses.

Je voudrais aussi remercier les membres du jury qui ont accepté et m'ont fait l'honneur de bien vouloir juger ce travail. Je les remercie pour la lecture attentive de ce manuscrit et l'intérêt qu'ils y ont porté :

*Je remercie chaleureusement Monsieur **A. Chaabi**, Professeur à l'université de Constantine, pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant la présidence de ce jury de soutenance.*

*Mes sincères remerciements s'adressent à Monsieur **A. Bellel**, professeur à l'université de Constantine, pour avoir accepté de juger mon travail.*

*Je remercie vivement Monsieur **F. Kerrou**, Maitre de Conférences à l'université de Constantine, d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

Mes remerciements vont à mes collègues du laboratoire LEMEAMED pour leur soutien à mon travail, leurs encouragements et leur sympathie.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce travail.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I	
Etude bibliographique sur les capteurs chimiques et rappels théorique sur le MOSFET	
Introduction	3
I- Etude théorique, et principe de base des capteurs chimiques.....	3
I-1 Les paramétrés des capteurs chimiques.....	3
I-2 Les éléments principaux d'un capteur chimique.....	4
II- Les capteurs chimiques ISFET (Ion Selective Field Effect Transistor).....	7
II-1 Structure et principe de fonctionnement d'un transistor MOSFET.....	8
II-1.1 Mode de fonctionnement	10
II-1.2 Régime de fonctionnement	12
II-1.3 Caractéristique générales et expressions analytiques d'un MOSFET.....	16
II-1.4 La transconductance du MOSFET.....	19
II-2 Principe de fonctionnement d'un capteur chimique ISFET.....	20
II-2.1 Principe physico-chimique de la détection des ions hydrogène.....	21
II-2.1.1 L'électrolyte.....	21
II-2.1.2 Interface électrolyte-solide.....	21
II-2.1.3 Interface Electrolyte-Isolant-Solide (EIS).....	24
II-3 Membranes sensibles au pH.....	25
Conclusion.....	28
Chapitre II	
Simulation des étapes technologiques de réalisation du capteur chimique ISFET par ATHENA	
Introduction.....	29
I- Conception par simulation (TCAD-SILVACO) du capteur ISFET par	29
I-1 Présentation du logiciel TCAD-SILVACO.....	29
I-1.1 Bases physiques du principe de fonctionnement du simulateur TCAD-SILVACO.....	30
I-1.1.1 Equations de bases de la physique des semi-conducteurs.....	30

I-1.1.2 Modèles physiques utilisés.....	31
I-1.2 Le logiciel ATHENA.....	35
I-1.3 Le logiciel ATLAS.....	37
II- Cahier des charges.....	38
III- Simulation en 2D de dispositifs sous ATHENA	41
III-1 Description du procédé technologique.....	41
III-1.1 Maillage du dispositif.....	41
III-1.2 Choix du substrat.....	42
III-1.3 Phase 1 : dépôt d'oxyde de pré-implantation.....	43
III-1.4 Phase 2 : Implantation N+ pour formation de la source et le drain.....	43
III-1.5 Phase 3 : étape de redistribution (recuit thermique isotherme).....	46
III-1.6 Phase 4 : formation du canal.....	48
III-1.7 Phase 5 : formation de l'oxyde de grille.....	49
III-1.8 Phase 6 : dépôt de nitrure de silicium Si_3N_4	50
III-1.9 Phase 7: métallisation.....	50
IV- Paramètres technologiques et géométriques du composant fini.....	51
Conclusion.....	52

Chapitre III

Caractérisation électrique du composant par ATLAS

Introduction	54
I- Optimisation des paramètres technologiques du canal du dispositif MOSFET.....	54
II- Caractérisation électrique du composant	61
II-1 Charge d'interface à l'interface isolant (Si_3N_4/SiO_2)/Silicium.....	61
II-2 Distribution du potentiel dans la structure.....	63
II-3 Caractéristiques statiques du composant électronique.....	65
III- Effet des polarisations de grille et de drain sur l'apparition de phénomènes particuliers dans le canal de L'ISFET.....	67
III-1 Phénomène de dégradation de la mobilité.....	68
III-2 Phénomène de saturation de la vitesse des porteurs libres dans le canal.....	70
III-3 Phénomène d'ionisation par impact.....	71
IV- Effet de la de la température sur le capteur ISFET.....	73
IV-1 Effet de la température sur le courant de drain.....	73
IV-2 Effet de la température sur la mobilité des porteurs.....	75
Conclusion.....	78

Conclusion générale.....	79
Références bibliographiques.....	81

Introduction générale

Introduction générale

La détection d'une espèce chimique ainsi l'évaluation de sa quantité ou de sa concentration dans tous les domaines touchant à la chimie et à la biochimie (environnement, alimentation, pharmacie, médecine,...) peuvent être réalisées soit à l'aide d'instruments d'analyse classiques tels que le chromatographe, qui sont généralement complexes, coûteux, volumineux et souvent difficiles à mettre en œuvre, soit à l'aide des capteurs chimiques mis au point depuis quarantaine d'années appelés plus couramment les microcapteurs qui ont l'avantage d'être compatibles avec les technologies de la microélectronique. Les capteurs chimiques sont des dispositifs simples, constitués d'une partie chimiquement sensible (couche sensible) permettant la reconnaissance chimique et d'un système transducteur transformant les grandeurs chimiques en un signal électrique facilement exploitable. Grâce à les techniques de microélectronique, la plupart des capteurs chimiques sont fabriqués par des procédés en masse et de façon collective. Ce dernier point présente divers avantages allant de la réduction en taille et un gain en fiabilité à un coût très bas.

Le but de ce travail a été consacré principalement de concevoir et d'étudier par simulation, les paramètres technologiques et électriques d'un capteur chimique potentiométrique de type ISFET (Ion Selective Field Effect Transistor), constitué d'une structure de base similaire à celle d'un transistor MOSFET, qui représente le transducteur électrique, et une couche sensible déposée sur l'oxyde de grille remplaçant l'électrode de grille métallique du transistor MOSFET conventionnel (transducteur chimique). Ce type de capteurs est caractérisé par sa taille très petite, son temps de réponse rapide, et la possibilité de production en nombre élevé, et enfin la possibilité d'intégration de l'électronique avec le capteur sur la même puce. Notre travail a été basé sur l'étude des paramètres technologiques et électriques du transducteur électrique (représenté par le transistor MOSFET) du capteur chimique ISFET.

L'outil de simulation utilisé dans ce travail est le logiciel TCAD-SILVACO. Ce logiciel permet de concevoir et prévoir les performances des dispositifs à base de semi-conducteur grâce à ces deux modules de simulation (ATHENA et ATLAS). Les différentes étapes du procédé technologique de fabrication (oxydation, diffusion, implantation ionique,...), ainsi le comportement physique et les paramètres technologiques du

composant électronique (distribution des porteurs dans la structure, profondeurs des jonctions, concentration des porteurs) ont été simulés à partir du logiciel ATHENA qui emploie des modèles physiques spécifiques. La simulation du comportement électrique de ce dispositif, a été réalisée au moyen de l'outil ATLAS.

Dans le premier chapitre, nous faisons un état de l'art sur les capteurs chimiques au moyen d'une étude bibliographique. Tout d'abord nous présentons une description sur les familles des capteurs chimiques avec les différents systèmes de détection. Puis nous approfondissons la théorie sur le principe de fonctionnement du transducteur transformant le signal chimique en un signal électrique basé sur la structure d'un transistor MOSFET. Ensuite, nous détaillons les principes fondamentaux de l'électrochimie, à travers les principales réactions qui se produisent aux interfaces (électrolyte/isolant/semiconducteur). Pour finir ce chapitre, nous décrivons plusieurs membranes sensibles aux ions d'hydrogène et autres types d'ions.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter le simulateur TCAD-SILVACO, ses performances, son principe de fonctionnement, ces équations de bases, les modèles physiques utilisés dans cette simulation, ainsi que ces outils de simulation (ATHENA et ATLAS) avec la plateforme de programmation (DECKBUILD) et l'outil de visualisation (TONYPLOT). Ensuite, nous ferons une description des différentes étapes génériques de la fabrication technologique (oxydation, diffusion, gravure,.....) du dispositif simulé sous ATHENA. Enfin, nous donnerons une synthèse sur les différents paramètres géométriques technologiques utilisés dans cette simulation.

Dans le troisième chapitre, nous présentons et analysons les résultats des simulations pour optimiser les paramètres technologiques de la région du canal, dans le but d'ajuster la valeur de la tension de seuil selon le cahier des charges. Puis, nous présentons la simulation électrique, tout d'abord, nous étudions l'effet des charges d'interface et la distribution du potentiel dans la structure. Nous présentons ensuite le réseau des caractéristiques électriques simulé au moyen de l'outil ATLAS. Par la suite, nous étudions les effets particuliers des polarisations de drain et grille sur le dispositif : dégradation de la température, saturation de la vitesse des électrons dans le canal, et ionisation par impact. Enfin, nous étudierons les effets de la température, pour deux valeurs de la température choisies autour de la température ambiante.

Chapitre I

*Etude bibliographique sur les capteurs
chimiques et rappels théorique sur le
MOSFET*

Introduction

Les problèmes soulevés par des domaines très diversifiés, tels que la pollution, le contrôle de qualité de notre environnement (surveillance des rejets industriels ou domestiques) et même la médecine (détection d'ion ou de molécules en solutions biologiques), se posent actuellement avec acuité. Des techniques d'analyses classiques sont utilisées pour la mesure des phénomènes physico-chimiques ou la détection des espèces chimiques. Mais la plupart de ces méthodes sont coûteuses, complexes, volumineuses. La mise au point de méthodes d'analyse de plus en plus précises et sélectives est alors nécessaire. La technique la plus séduisante est apparue depuis une quarantaine d'années sous le terme de capteur chimique. Le développement des microcapteurs a vu le jour grâce à deux technologies adaptées qui ont été combinées : la technologie des circuits intégrés telle que le transistor à effet de champ, et les électrodes iono-sensibles conventionnelles. Il s'est donc avéré possible de fabriquer des matériaux chimiquement sensibles par le moyen de la technologie de la microélectronique [1].

Les capteurs chimiques sont des dispositifs miniaturisés qui convertissent un état chimique en un signal électrique. Un état chimique est déterminé par les différentes concentrations, pressions partielles, ou activités des particules telles que les atomes, molécules, ions, ou composés biologiques qui peuvent être détectés dans un gaz, liquide, ou en phase solide [2].

Dans ce chapitre, nous présenterons le principe de fonctionnement d'un capteur chimique de type ISFET. Tout d'abord, nous ferons une description des différentes familles des capteurs chimiques pour plusieurs mécanismes de détection. Ensuite, nous présenterons la théorie d'un capteur chimique de type ISFET. Dans un premier temps nous étudierons le transducteur potentiométrique à base d'une structure MOSFET. Puis, nous étudierons les phénomènes physico-chimiques à l'interface Electrolyte-Isolant-Solide. Enfin, nous décrirons plusieurs membranes ionosensibles pour le choix de la couche dite sensible.

I- Etude théorique, et principe de base des capteurs chimiques

I-1 Les paramètres des capteurs chimiques :

Le choix et les limites d'un type de capteurs chimiques est lié à des paramètres qui peuvent influencer leur rôle et leur fonctionnement [3] :

- a- La sensibilité : elle change dans un signal mesuré par unité de concentration.
- b- -La limite de détection : la valeur la plus basse de concentration qui peut être détectée par un capteur, dans des conditions définies.
- c- La gamme dynamique : la gamme de concentration entre la limite de détection et la valeur de concentration supérieure.
- d- La sélectivité : la réponse d'un capteur chimique est liée à l'espèce à détecter, la modification du signal de sortie peut être introduite par la détection d'autres espèces chimiques.
- e- Le temps de réponse : c'est le temps nécessaire pour que le signal de sortie soit stable pour une nouvelle valeur de concentration après la modification de la concentration initiale.
- f- La stabilité : c'est la capacité d'un capteur pour maintenir ses performances pendant un certain temps lors d'une exécution.

I-2 Les éléments principaux d'un capteur chimique

Les capteurs chimiques contiennent habituellement deux composantes de base connectées en série : une partie sélective (récepteur ou couche sensible), constitué d'un matériau de détection sensible à l'espèce recherchée (molécule, ion,..), et un transducteur physico-chimique qui transforme la réponse chimique en signal électrique [3].

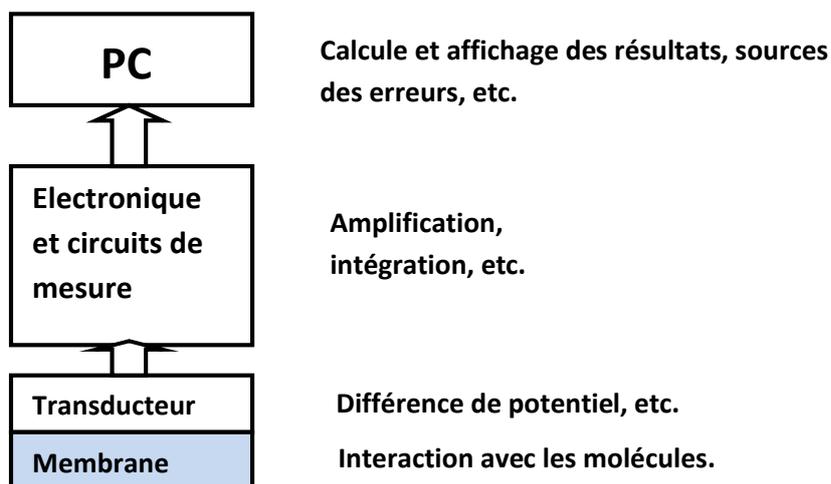


Figure I-1 : Schéma synoptique d'un capteur chimique

Selon les interactions avec les espèces chimiques (absorption, réaction chimique, transfert de charge,..), les propriétés physico-chimiques de la couche sensible, telles que la masse, le volume, les propriétés optiques,.., vont changer. Ces changements des propriétés

de la couche sensible peuvent être détectés par différents transducteurs et transférés en un signal électrique. Le signal mesuré est traduit par un changement de la valeur initiale du courant, du potentiel, de la conductivité ou de la fréquence.

Les capteurs chimiques sont classés selon leurs types de détection [4] :

- **La détection thermique :**

Les capteurs thermométriques ou calorimétriques tels que les thermistances sont basés sur la détermination d'une espèce chimique par la mesure la variation de température produite lors d'une détection d'un élément chimique. Ce type de capteurs sont peu utilisés parce qu'ils sont limités aux analyses en milieu produisant que des variations thermiques [5].

- **La détection optique**

La lumière peut être considérée comme des particules (photons) ou des ondes électromagnétiques selon le principe de la dualité corpusculaire. Les propriétés des ondes électromagnétiques telles que l'amplitude, la fréquence, la phase, et l'état de polarisation peuvent être employées pour concevoir des capteurs optiques. Le principe de fonctionnement de ces capteurs est basé sur l'hypothèse que, si un échantillon est irradié avec une lumière visible ou avec des ondes électromagnétiques, le rayonnement peut être absorbé, ce qui a comme conséquence une diminution de l'intensité du rayonnement détectée par rapport au faisceau primaire.

On peut citer comme exemple de capteurs optiques, les capteurs chimiques à base de fibres optiques. Grâce à leur faible poids et leur petite taille, on peut effectuer des mesures dans des endroits difficiles d'accès. Ces capteurs sont constitués de trois parties : émetteur, optrode et détecteur. L'optrode est la partie principale du capteur, elle sert comme indicateur de changement de ses propriétés. Cependant, ces capteurs à fibre optique restent toujours coûteux, avec les problèmes de connexions, en plus de l'influence néfaste de la lumière naturelle sur ce type de capteurs [6].

- **La détection électrochimique**

Les capteurs électrochimiques présentent la gamme de produits les plus anciennement utilisés, leurs principes se basent sur le phénomène de transfert de charges. On peut classer les capteurs chimiques selon leur mode de transduction :

✓ **La détection ampérométrique**

Les capteurs ampérométriques sont basés sur la mesure du rapport courant-tension dans une cellule électrochimique comportant des électrodes. Un potentiel est appliqué aux électrodes, et un courant qui est proportionnel à la concentration des corps électroactifs est mesuré. Ce type de capteurs est généralement caractérisé par une bonne sensibilité et rapidité. Ainsi les capteurs ampérométriques peuvent être miniaturisés plus facilement que les capteurs potentiométriques. Par conséquent, il y a une tendance en faveur de la détection ampérométrique, en particulier pour des biocapteurs enzymatiques [3]. Cependant, les mesures sont sensibles à la température [6].

✓ **La détection conductimétrique**

Les capteurs conductimétriques sont basés sur la mesure de la conductance entre deux électrodes. Pour les milieux aqueux, la conductance peut être mesurée, car celle-ci est liée à la concentration des ions. Il est aussi possible de déposer une couche sensible entre les électrodes. En présence d'espèces piégées sur la couche sensible, la réaction provoquée par ces espèces conduit à un changement de la conductance de la couche sensible. L'avantage principal de la détection conductimétrique, est qu'un grand nombre des réactions enzymatiques implique une diminution ou une augmentation de l'espèce chargée. Un tel mode de transduction est également très rapide, peu coûteux, n'exige pas une électrode de référence, et convient à la miniaturisation. Par contre, ce mode de transduction est caractérisé par de faibles sélectivité et sensibilité [7].

✓ **La détection potentiométrique**

La mesure potentiométrique a été pour longtemps une partie significative d'analyse chimique instrumentale. Dans de tels capteurs, l'information analytique est obtenue en convertissant la réponse chimique en un signal électrique, qui est proportionnel à la concentration (activité) générée ou consommée dans le processus chimique. Un tel mécanisme de transduction est très attirant pour des opérations des biocapteurs en raison de sa sélectivité, sa simplicité, son coût de revient assez bas. Cependant, il est moins sensible et souvent plus lent par rapport aux capteurs ampérométriques [6]. Les dispositifs potentiométriques se distinguent selon deux types :

a- Les Electrode ionosensible (EIS) :

Ce sont les plus anciens des capteurs potentiométriques. Ce type de capteurs est constitué d'une électrode de travail ou de mesure sur laquelle est fixée une membrane ionosensible (Ion Selective Electrode), et une électrode de référence. L'électrode ionosensible mesure la différence de potentiel entre les deux électrodes, le potentiel de l'électrode de mesure varie lorsque l'électrolyte provoque une interaction avec la membrane ionosensible. Ce potentiel est proportionnel à la concentration des ions. Ces EIS servent dans plusieurs domaines d'application avec une large gamme de détection. Cependant, elles sont fragiles, coûteuses, non intégrables, et ont besoin d'une maintenance régulière.

b- Les ChemFET (Chemical Field Effect Transistor)

L'emploi de transistors à effet de champ avec une grille métallique isolée, en modifiant cette grille avec l'intégration d'une couche chimiquement sensible, permet d'obtenir des capteurs chimiques à base de transistors à effet de champ. Ce type de capteurs a été développé vers les années 70 par un savant hollandais P.Bergveld [6]. Un ChemFET qui réagit avec sensibilité vis-à-vis d'un type d'ions est appelé ISFET (Ion Selective Field Effect Transistor), il y a aussi les BioFETs (Biologically sensitive Field Effect Transistor), les EnFET (Enzyme modified Field Effect Transistor), GasFET (Gas Field Effect Transistor). Les principaux avantages de ces capteurs chimiques sont leur compatibilité avec la microélectronique, leur production en masse, leur faible coût, et simplicité d'utilisation. La miniaturisation des dimensions, l'amélioration et l'exploitation de nouvelles membranes, fait l'objet de nombreuses recherches d'actualité.

II- Les capteurs chimiques ISFET (Ion Selective Field Effect Transistor)

Les capteurs chimiques ISFET mis au point au début des années 1970 par P.Bergveld, ont permis de mesurer le changement du pH par un décalage correspond dans la tension de seuil du dispositif [8]. La structure de base d'un ISFET est similaire à celle d'un MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), avec une électrode de grille remplacée par une membrane sélective appelée la couche "ionosensible" (Si_3N_4 , Al_2O_3 , Ta_2O_5 ,...). La compatibilité avec la microélectronique donne l'opportunité d'intégrer plusieurs capteurs (multi-capteurs) sur la même puce pour la détection de plusieurs ions simultanément. Le contrôle de qualité des eaux est l'une des tâches les plus importantes

associées aux capteurs ISFET. Ce type de capteurs est employé généralement pour mesurer la concentration des polluants dans l'eau (Na^+ , Ca^{++} , NH_4^+ ,...). Il est aussi utilisé dans le domaine biomédical pour la détection d'enzymes, bactéries, et aussi en milieu sanguin pour détecter les ions sodium Na^+ et potassium K^+ .

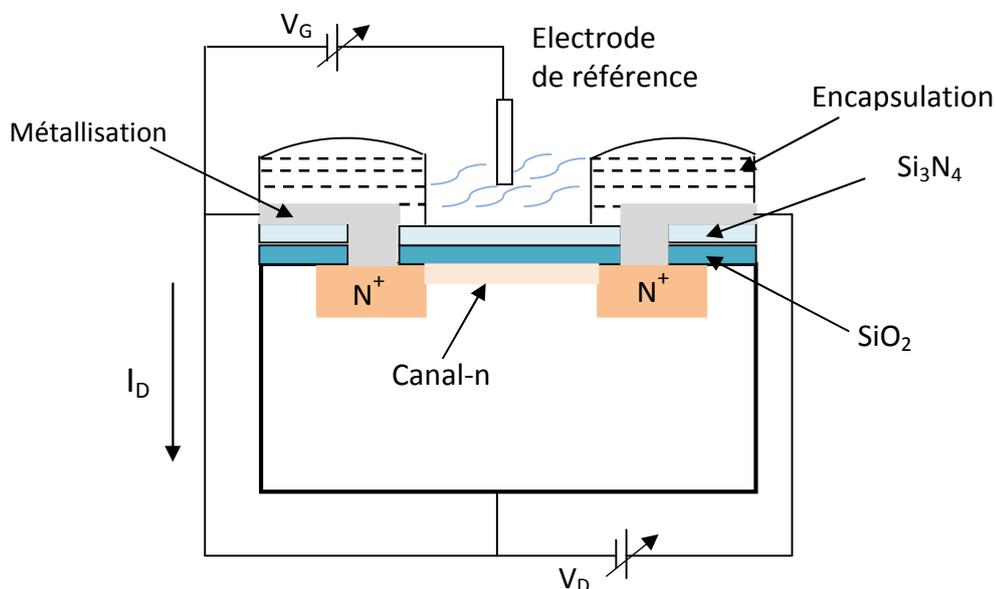


Figure I-2 : Capteur ISFET

Le principe de fonctionnement d'un capteur ISFET va être expliqué en se basant sur le capteur traditionnel pH-ISFET. Ce type de capteur a permis de mesurer l'activité d'ions hydrogène en solution. La structure d'un pH-ISFET est identique à celle d'un MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), c'est pourquoi nous allons présenter dans ce qui suit, la structure et le principe de fonctionnement d'un tel dispositif.

II-1 Structure et principe de fonctionnement d'un transistor MOSFET

Un transistor MOS se compose généralement d'un substrat de semi-conducteur sur lequel est développée une couche mince diélectrique tel que le dioxyde de silicium SiO_2 , le nitrure de silicium Si_3N_4 ,..., et d'une couche conductrice (un métal ou du polysilicium fortement dopé) appelée électrode de grille qui est déposée sur l'isolant. Deux régions fortement dopées par implantation ionique ou diffusion thermique appelées la source et le drain sont formées dans le substrat de chaque côté de la grille [9].

Notons que la structure est symétrique. En raison de cette symétrie, on ne peut pas distinguer la source et le drain, les rôles de ces derniers sont définis après que les tensions de polarisation soient appliquées. La région sur laquelle le potentiel appliqué est le plus élevé est le drain, l'autre est la source généralement à la masse [10]. L'espace entre source et drain est appelé canal. Il y a deux types de transistors MOS : les NMOS dont le canal de conduction est constitué d'électrons, et les PMOS dont le canal de conduction est constitué de trous. Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser au transistor NMOS uniquement.

Un transistor NMOS au silicium est fabriqué à partir d'un substrat semi-conducteur habituellement de silicium type P, les zones source et drain de type N fortement dopées sont équivalentes à des réservoirs d'électrons de chaque côté du canal. Une couche mince de SiO_2 isole le canal d'une métallisation constituant l'électrode de grille. La tension appliquée sur l'électrode de grille assure le contrôle de la conductivité du canal. Le choix judicieux de la tension de grille va permettre le passage d'un courant électrique entre la source et le drain.

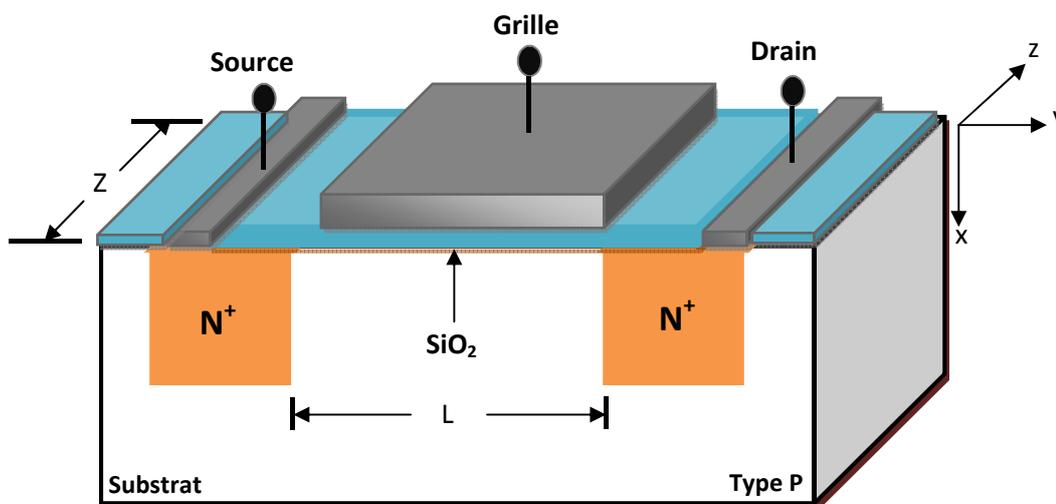


Figure I-3 : Transistor MOSFET

L'application entre grille et source d'une tension de grille V_G positive repousse les trous (porteurs majoritaires) et attire les électrons (porteurs minoritaires) du substrat de type P. Lorsque l'une des jonctions (source ou drain) est polarisée en inverse par une tension de drain V_D avec une tension V_G suffisamment positive pour atteindre l'inversion, un canal de type N peut être formé pour assurer la continuité entre la source et le drain. La circulation d'un courant appelé courant de drain I_D entre le drain et la source devient alors possible.

II-1.1 Mode de fonctionnement

Le fonctionnement d'un transistor MOSFET dépend de la formation d'un canal de conduction sous la grille entre la source et le drain. Un canal de conduction entre la source et le drain peut être formé soit en utilisant une couche implantée ou enterrée dans le substrat, soit en appliquant une tension de grille [11].

- *MOSFET à canal non-préformé (Normally-OFF)*

Le transistor qui n'a aucun canal de conduction entre la source et le drain à la tension nulle de grille $V_{GS}=0$, n'a aucun courant de drain qui circule, parce que le circuit source-drain se compose de deux jonctions en série l'une est PN, l'autre est NP, et il y aura donc toujours l'une des deux en inverse. Ce type de transistors s'appelle transistor MOS à enrichissement (Normally-OFF), car une tension V_{GS} positive enrichit le canal en porteurs minoritaires, permettant le passage du courant [9].

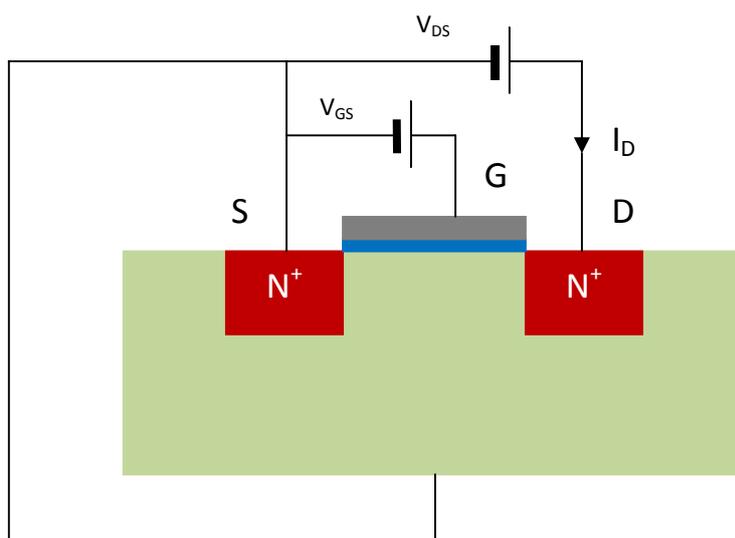


Figure I-4: Transistor MOSFET Normally-OFF

Dans tels dispositifs une certaine tension minimale de grille appelée la tension de seuil ou tension d'ouverture qui est nécessaire pour créer un canal de conduction.

On peut définir la tension de seuil d'un transistor MOSFET comme étant la tension minimale de la tension de grille qui doit être appliquée pour former une couche d'inversion [10].

La caractéristique de transfert $I_D(V_{GS})$ va avoir la forme suivante, qui montre un début de conduction à partir de $V_{GS}=V_T$.

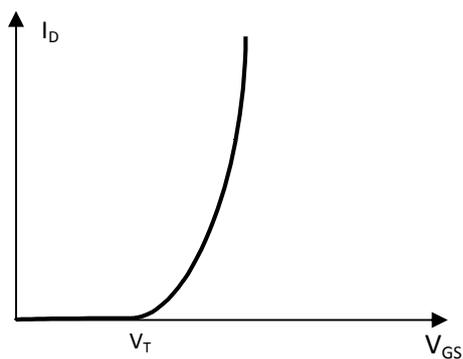


Figure I-5 : Caractéristique de transfert d'un MOSFET à enrichissement.

- *MOSFET à canal préformé (Normally-ON)*

Si le transistor possède un canal de conduction entre la source et le drain de telle sorte que le dispositif est passant, même à la tension nulle de la grille, le dispositif est appelé transistor MOS à appauvrissement (Normally-ON) [9].

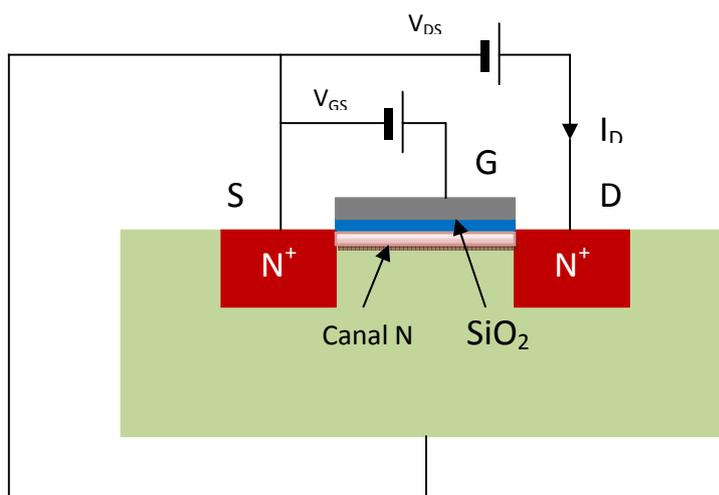


Figure I-6: Transistor MOSFET Normally-ON

La caractéristique de transfert obéit à la forme suivante, où on constate que la tension de seuil est négative.

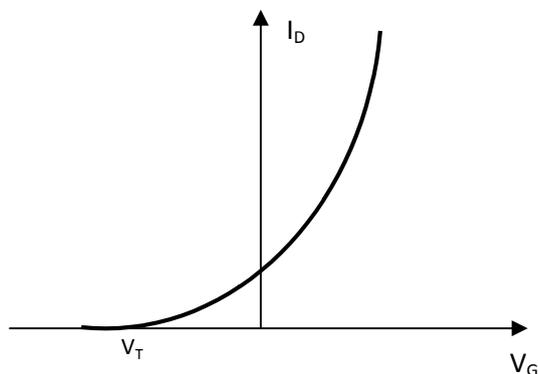


Figure I-7: Caractéristique de transfert d'un MOSFET à appauvrissement

II-1.2 Régime de fonctionnement [10]

L'état électrique de la structure MOSFET est conditionné par l'état de la capacité MIS (Métal-Isolant-Semiconducteur). On distingue principalement quatre régimes de fonctionnement [12]. Le diagramme de bandes d'une structure MIS avec un substrat de type P va nous aider à expliquer leur origine.

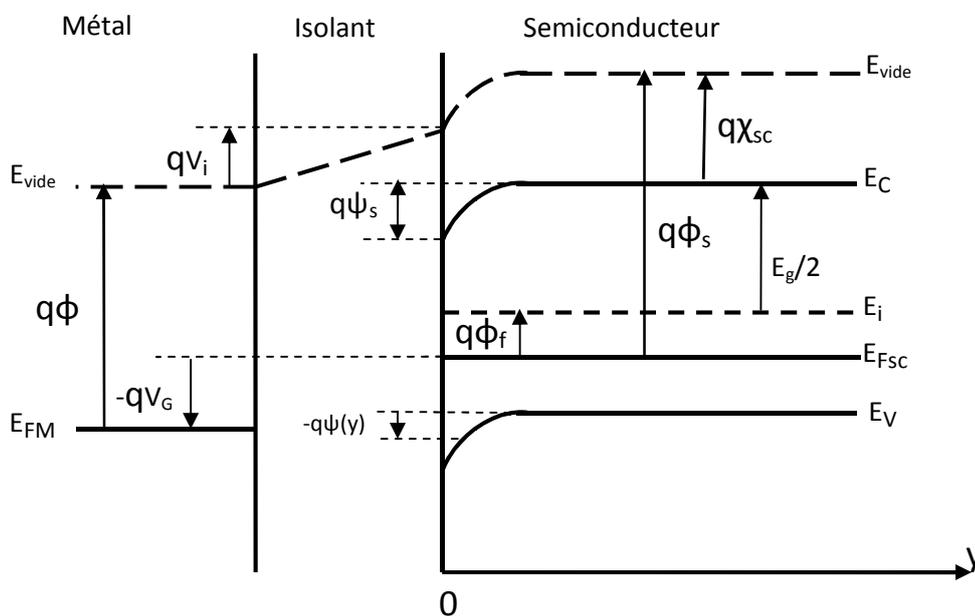


Figure I-8 : Diagramme de bande d'une structure MOS à substrat de type P [10].

Où :

- E_c : Energie du bas de la bande de conduction du semiconducteur ;
- E_v : Energie du haut de la bande de valence du semiconducteur ;
- E_{Fsc} : Energie du niveau de Fermi du semiconducteur ;
- E_i : Energie du niveau intrinsèque du semiconducteur ;
- E_{FM} : Energie du niveau de Fermi du métal ;
- E_g : Energie de la bande interdite ;
- $q\phi_f$: Différence d'énergie entre le niveau de fermi et le niveau intrinsèque ;
- ϕ_m : Travail de sortie du métal ;
- ϕ_{sc} : Travail de sortie du semiconducteur ;
- χ_{sc} : Affinité électronique du semiconducteur ;
- V_G : Tension appliquée sur la grille ;
- V_i : Chute de tension dans l'isolant ;
- $\Psi(y)$: Potentiel électrostatique à l'abscisse y ;
- Ψ_s : Potentiel électrostatique à l'interface isolant/semiconducteur ou potentiel de surface.

Pour obtenir la condition de bandes plates où le potentiel de surface Ψ_s est nul à la surface du semiconducteur, il faut appliquer une tension V_{FB} appelée la tension de bandes plates (ou Flat Band) sur la grille, afin de pouvoir compenser la différence des travaux de sortie, et la charge dans l'oxyde Q_{OX} .

$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q_{OX}}{C_i}, \quad \phi_{ms} = \phi_m - \phi_{sc} \quad \text{I-1}$$

Où C_i est la capacité d'isolant, ϕ_{ms} est la différence entre les travaux de sortie entre le semiconducteur et le métal.

Pour un dispositif à canal N, la charge de grille est appelée $Q_G = -Q_S$, où Q_S est la charge dans le semi-conducteur.

Régime d'accumulation : $\psi_s < 0$ ($V_G < V_{FB}$)

Quand une tension négative est appliquée à la grille, la bande de valence s'approche du niveau de Fermi, et ceci a comme conséquence une augmentation exponentielle de la densité des porteurs majoritaires (trous) à l'interface Oxyde/Semi-conducteur, c'est ce qui correspond au régime d'accumulation. Une barrière de potentiel existe entre la source et le substrat va interrompre la circulation des électrons de la source vers le drain, le transistor se trouve à l'état bloqué.

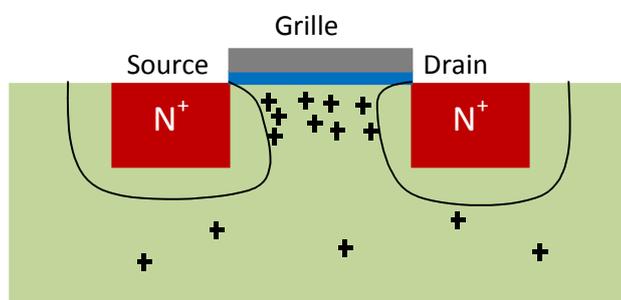


Figure I-9 : Transistor NMOSFET en régime d'accumulation

Régime de déplétion : $\phi_f < \psi_s < 0$ ($V_G > V_{FB}$)

Les porteurs majoritaires sont repoussés en profondeur par une tension de grille V_G positive. La concentration en électrons augmente mais reste encore plus faible que celles de trous. Il se crée alors une zone de charge d'espace, l'absence de charges libres induit une capacité de déplétion (C_{DEP}). La charge par superficie dans la région de $y=0$ à $y=W_d$, appelée charge de déplétion (Q_{DEP}) est égale, le transistor est toujours bloqué.

$$Q_{DEP} = -qN_aW_d = -\sqrt{2q\varepsilon_{si}N_a\psi_s} \quad \text{I-2}$$

Où, ε_{si} est la permittivité du silicium, W_d est la largeur de la zone de déplétion.

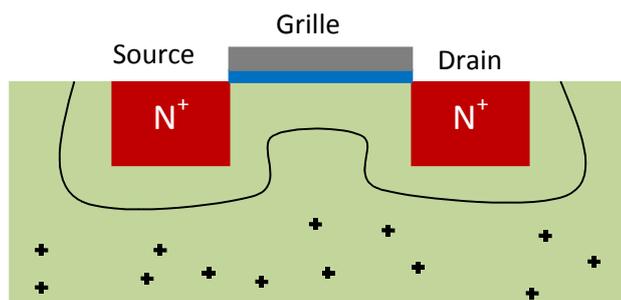


Figure I-10 : Transistor NMOSFET en régime de déplétion.

Régime de faible inversion : $\phi_f < \psi_s < 2\phi_f$ soit $V_{FB} < V_G < V_T$.

Lorsque $\psi_s = \phi_f$ la concentration en électrons libres est égale à celle de trous et prend la valeur de la concentration intrinsèque n_i , la barrière de potentiel entre la source et le drain reste importante, quelque électrons arrivent à la franchir.

Régime de forte inversion : $\psi_s > 2\phi_f$ soit $V_G > V_T$

Lorsque on applique des polarisations de grille supérieures à la tension de seuil la concentration des porteurs minoritaires (électrons) devient plus importante que celle des majoritaires (trous), il en résulte qu'un grand nombre d'électrons caractérisés par une charge d'inversion appelée Q_{inv} présents dans le canal. Donc le transistor devient passant grâce à la couche d'inversion formée. En fonction de la polarisation de drain, deux régimes peuvent être distingués : un régime linéaire et un régime de saturation.

$$Q_G = -Q_S = Q_{DEP} - Q_{inv} \tag{I-3}$$

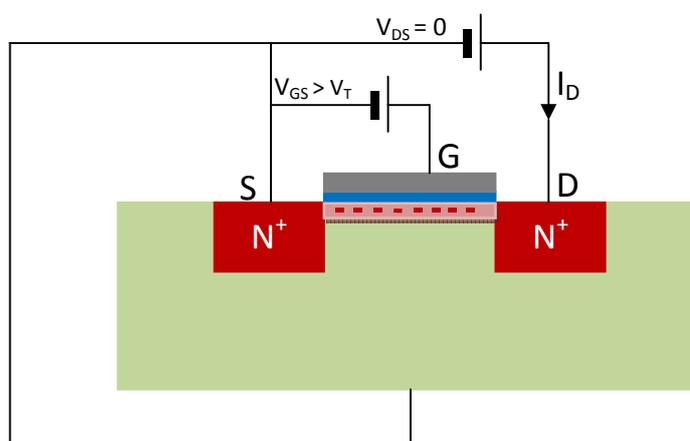


Figure I-11 : Transistor NMOSFET en régime linéaire.

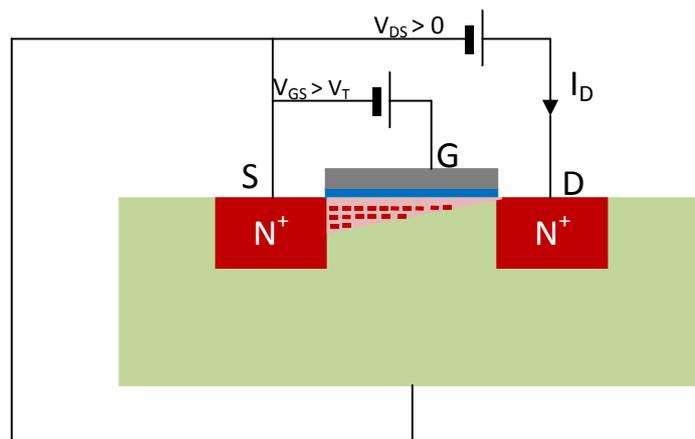


Figure I-12 : Transistor NMOSFET en régime de saturation.

II-1.3 Caractéristique générales et expressions analytiques d'un MOSFET [13].

Pour un dispositif MOSFET à canal N la tension de seuil V_T peut être négative ou positive. Quand le dispositif a une tension de seuil négative un canal de conduction existe déjà à l'état d'équilibre donc il faut appliquer une tension négative pour mettre le dispositif à l'état off c'est-à-dire enlever la conduction. L'expression de la tension de seuil pour un transistor MOS à canal N est donnée par la relation suivante [13] :

$$V_T = V_{FB} + \frac{|Q_{DEP}|}{C_i} + 2\phi_f \quad \text{I-4}$$

Le courant de drain est dû à la dérive des électrons de la source vers le drain, avec l'application d'une polarisation de drain, il existe une chute de tension de la source à chaque point le long du canal, que nous appelons $V(y)$. Pour réaliser une forte inversion, le potentiel à travers l'oxyde doit être égal à $2\phi_f + V(y)$. La largeur maximale de la zone de déplétion est donnée par la relation suivante :

$$W_{d \max} = \sqrt{\frac{2\epsilon_{si}}{qN_a} [V(y) + 2\phi_f]} \quad \text{I-5}$$

La charge de déplétion est alors donnée par :

$$Q_{DEP} = -qN_a W_{d \max} = -\sqrt{2qN_a \epsilon_{si} (V(y) + 2\phi_f)} \quad \text{I-6}$$

La charge totale dans le silicium Q_s peut être donnée par :

$$Q_s = -C_i [V_G - V_{FB} - 2\phi_f - V(y)] \quad \text{I-7}$$

La charge d'inversion peut être trouvée par la différence entre la charge totale dans le semi-conducteur et la charge de déplétion :

$$Q_i = Q_s - Q_{DEP} = -C_i [V_G - V_{FB} - 2\phi_f - V(y)] - \sqrt{2qN_a\epsilon_{si}(V(y) + 2\phi_f)} \quad \text{I-8}$$

En utilisant l'équation I-3, l'expression générale du courant de drain peut être déterminée, incluant la dépendance spatiale de la tension $V(y)$ dans le canal avec l'équation I-8 :

$$I_D = \frac{Z\mu_n C_i}{L} \left\{ (V_G - V_{FB} - 2\phi_f)V_D - \frac{V_D^2}{2} - \frac{2\sqrt{2qN_a\epsilon_{si}}}{3C_i} \left[(V_D + 2\phi_f)^{3/2} - (2\phi_f)^{3/2} \right] \right\} \quad \text{I-9}$$

Où μ_n est la mobilité des électrons, Z la dimension du dispositif dans la direction z , et L la longueur du canal, représentées sur la figure I-3.

Le tracé du courant de drain en fonction de la tension de drain est montré ci-dessous :

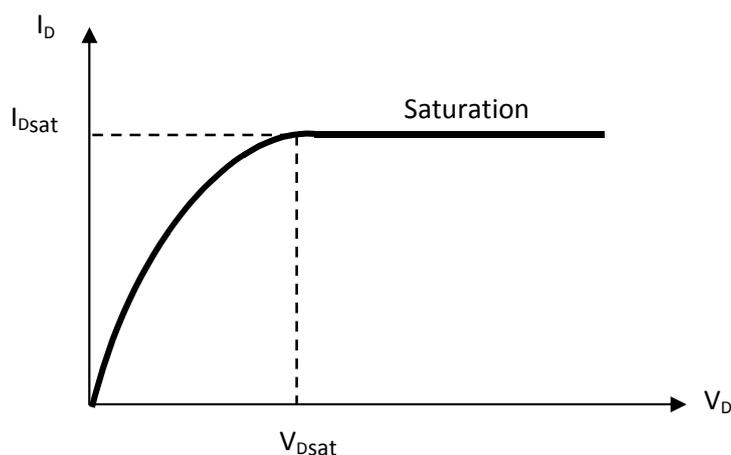


Figure I-13 : Caractéristique $I_D(V_D)$

On distingue deux régions différentes, la région linéaire et la région de saturation, qui vont être explicitées dans ce qui suit [10].

a. Région linéaire ($0 < V_D < V_{Dsat}$)

Le courant de drain est petit. Par conséquent, le terme impliquant V_D^2 dans l'équation I-9 peut être négligé. En utilisant un développement Taylor le terme $(V_D + 2\phi_f)^{3/2}$ peut être réduit seulement au premier ordre. L'expression du courant de drain dans la région linéaire est alors donnée par :

$$I_D = \frac{\mu_n C_i Z}{L} \left(V_G - V_{FB} - 2\phi_f - \frac{\sqrt{4\epsilon_{si} N_a \phi_f}}{C_i} \right) V_D \quad \text{I-11}$$

On peut déterminer la tension de seuil à partir de l'équation I-4 :

$$V_T = V_{FB} + \frac{|Q_{DEP}|}{C_i} + 2\phi_f = V_{FB} + 2\phi_f + \frac{\sqrt{4\epsilon_{si} N_a \phi_f}}{C_i} \quad \text{I-12}$$

En remplaçant I-11 dans I-10, le courant de drain peut être écrit comme suit :

$$I_D = \frac{\mu_n C_i Z}{L} (V_G - V_T) V_D \quad \text{I-13}$$

b. Région de saturation : ($V_{Dsat} \leq V_D$)

Dans le cas où $V_D \geq V_G - V_T$ le transistor MOS fonctionne en mode de saturation, la charge d'inversion n'est plus uniforme, le canal devient pincé coté drain créant un point de pincement qui se déplace vers la source lorsque la tension de drain augmente.

L'expression simplifiée du courant de drain en mode de saturation est donnée par la relation suivante [13] :

$$I_{Dsat} = \frac{\mu_n C_i Z}{2L} (V_G - V_T)^2 \quad \text{I-14}$$

II-1.4 La transconductance du MOSFET :

La transconductance g_m , est l'un des paramètres les plus importants pour la mesure du gain des dispositifs, elle est définie comme étant la dérivée du courant de drain par rapport à la tension de grille V_G [10] :

$$g_m = \left. \frac{dI_D}{dV_G} \right|_{V_D} \quad \text{I-15}$$

Pour le régime linéaire, la transconductance est donnée par la relation suivante :

$$g_m = \mu_n C_i \left(\frac{Z}{L} \right) V_D \quad \text{I-16}$$

Et pour le régime de saturation, la transconductance est donnée par :

$$g_m = \mu_n C_i \left(\frac{Z}{L} \right) (V_G - V_T) \quad \text{I-17}$$

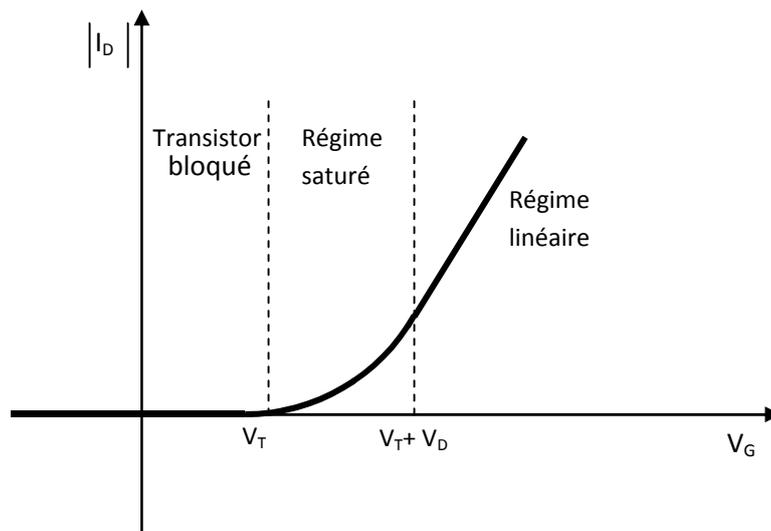


Figure I-14 : Caractéristique $I_D(V_G)$

II.2- Principe de fonctionnement d'un capteur chimique ISFET

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le capteur ISFET a la structure d'un MOSFET seulement dans le cas d'un capteur chimique ISFET, la grille métallique est remplacée par l'ensemble constitué d'une électrode de référence, de l'électrolyte à analyser et d'une couche sensible à l'ion recherché. Le principe de fonctionnement du capteur chimique ISFET est basé sur le piégeage des ions dans la couche ionosensible. Les charges piégées introduisent une variation du potentiel chimique Ψ_0 (eq (I-18)). Ce changement peut être trouvé dans la description de la tension de bandes plates V_{FB} . Comme le métal de grille n'est pas présent, le terme ϕ_m n'est plus considéré. Par contre, le potentiel appliqué sur l'électrode de référence, les phénomènes introduits à l'interface isolant-solution (ou électrolyte), et aussi les charges ignorées dans l'isolant ou à l'interface isolant-semiconducteur doivent être impliquées dans la nouvelle expression de la tension de bandes plates V_{FB} [14].

$$V_{FB}(ISFET) = E_{ref} - \psi_0 + \chi^{sol} - \phi_{si} - \frac{Q_{OX} + Q_{SS}}{C_{OX}} \quad \text{I-18}$$

Où:

E_{ref} : Potentiel appliqué sur l'électrode de grille ;

Ψ_0 : Potentiel électrostatique qui dépend de pH ;

χ^{sol} : Potentiel de surface de l'électrolyte ;

Q_{SS} : Charge localisée à l'interface oxyde/silicium ;

Q_{OX} : Charge localisée dans l'oxyde.

Le courant de drain d'un pH-ISFET I_D dans la région linéaire est donné par l'expression suivante :

$$I_D = \mu_n C_i \frac{Z}{L} \left(\left(V_G - \left(E_{ref} - \psi_0 + \chi^{sol} - \frac{\phi_{si}}{q} - \frac{Q_{OX} + Q_{SS}}{C_{OX}} - \frac{Q_{DEP}}{C_{OX}} + 2\phi_f \right) \right) V_D - \frac{V_D^2}{2} \right) \quad \text{I-19}$$

Seule la variation du potentiel électrostatique ψ_0 qui représente la différence de potentiel entre la membrane et la solution, influe sur le courant de drain. Le principe de

le fonctionnement d'un pH-ISFET est basé sur le piégeage des ions au niveau de la couche ionosensible.

II-2.1 Principe physico-chimique de la détection des ions hydrogène :

La plupart des électrolytes sont à base de solutions aqueuses. Le potentiel électrostatique ψ_0 développé, est le seul terme qui dépend réellement du pH de la solution électrolyte résultant de l'interaction de la surface de la membrane ionosensible avec les ions d'hydrogène présents dans l'électrolyte [15].

II-2.1.1 L'électrolyte

L'eau est un solvant polaire, ce qui signifie que ces molécules ne sont pas symétriquement chargées, c'est cette polarité des molécules qui lui permet de se décomposer. D'une façon générale, la conduction dans un électrolyte est induite lorsqu'on applique une polarisation à partir d'un circuit électronique [16].



L'équation (I-22) est gouvernée par la constante d'équilibre, donnée par l'expression suivante :

$$K_{eq} = \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]} \quad \text{I-21}$$

L'ajout d'un acide ou base va provoquer une modification d'équilibre entre la concentration des ions H^+ et OH^- .

II-2.1.2 Interface électrolyte/solide

Dans un processus électrochimique, à l'interface électrolyte/solide, la transformation chimique obéit au phénomène de transfert de charge électrique par une réaction d'oxydation et de réduction :



Un équilibre local est établi à la surface du capteur, ce qui conduit à la génération d'un potentiel d'équilibre proportionnel à la concentration des espèces en solution selon la loi de Nernst [5] :

$$E_{eq} = E_0 + \frac{k_B T}{nq} \ln \frac{c_{ox}}{c_{red}} \quad \text{I-23}$$

Avec E_0 le potentiel standard, n nombre d'électrons, k_B la constante de Boltzmann, T température absolue, c_{ox} et c_{red} les concentrations des espèces Ox et Red en solution, respictivement.

Comme nous l'avons déjà mentionné, le seul paramètre qui influe sur le comportement du courant de drain, est le potentiel ψ_0 . Par l'intermédiaire de ce paramètre, l'information chimique est transformée en un signal électrique [15].

L'activité des ions d'hydrogène en fonction du potentiel ψ_0 est donnée par la relation de Boltzmann :

$$a_{H_S^+} = a_{H_B^+} \exp\left(-\frac{q\psi_0}{k_B T}\right) \quad \text{où} \quad pH_S = pH_B \exp\left(-\frac{q\psi_0}{2,3k_B T}\right) \quad \text{I-24}$$

a_H : l'activité des ions d'hydrogène en surface (S), et en solution (« Bulk » B) ;

T : la température absolue.

Deux capacités peuvent être déterminées, la capacité intrinsèque β_{int} . Cette capacité a une relation directe avec l'adsorption sur les sites de la surface de l'isolant, donnée par l'équation suivante [6] :

$$\frac{\delta\sigma_0}{\delta pH_S} = -q \frac{\delta[B]}{\delta pH_S} = -q\beta_{int} \quad \text{I-25}$$

Où, σ_0 est la charge par unité de surface, et B est le nombre des sites chargés.

La capacité différentielle C_{dif} , est due à la variation du potentiel électrochimique ψ_0

$$\frac{\delta\sigma_{DL}}{\delta\psi_0} = -q \frac{\delta\sigma_0}{\delta\psi_0} = -C_{dif} \quad \text{I-26}$$

Où, σ_{DL} est charge de la double couche électrique, elle apparaît quand l'électrode est immergée dans un électrolyte [6].

D'après les équations II-24, 25, 26 on obtient :

$$\frac{\delta\psi_0}{\delta\left(pH_B + \frac{q\psi_0}{2,3k_B T}\right)} = -\frac{q\beta_{int}}{C_{dif}} \quad \text{I-27}$$

Le coefficient de sélectivité α peut être déduit après arrangement, comme suit :

$$\frac{\delta\psi_0}{\delta pH_B} = -2,3 \frac{k_B T}{q} \alpha \quad \text{où} \quad \alpha = \frac{1}{\frac{2,3k_B T C_{dif}}{q^2 \beta_{int}} + 1} \quad \text{I-28}$$

Ce coefficient varie entre 0 et 1.

Une répartition des charges et des potentiels est introduite, lorsque les deux phases électrolyte-solide sont mises en contact. Les charges sur la surface du solide sont générées par l'ionisation des groupes de la surface dûs à leurs réaction d'équilibre acide-base avec les ions de H^+ de l'électrolyte. Ces charges dépendent de la concentration des ions H^+ dans la solution électrolyte et le potentiel électrique sur la surface [17]. La redistribution des charges est décrite par le modèle de Stern, pour définir la double couche électrique. Ce modèle est un modèle amélioré du modèle de Gouy-Chapman [18].

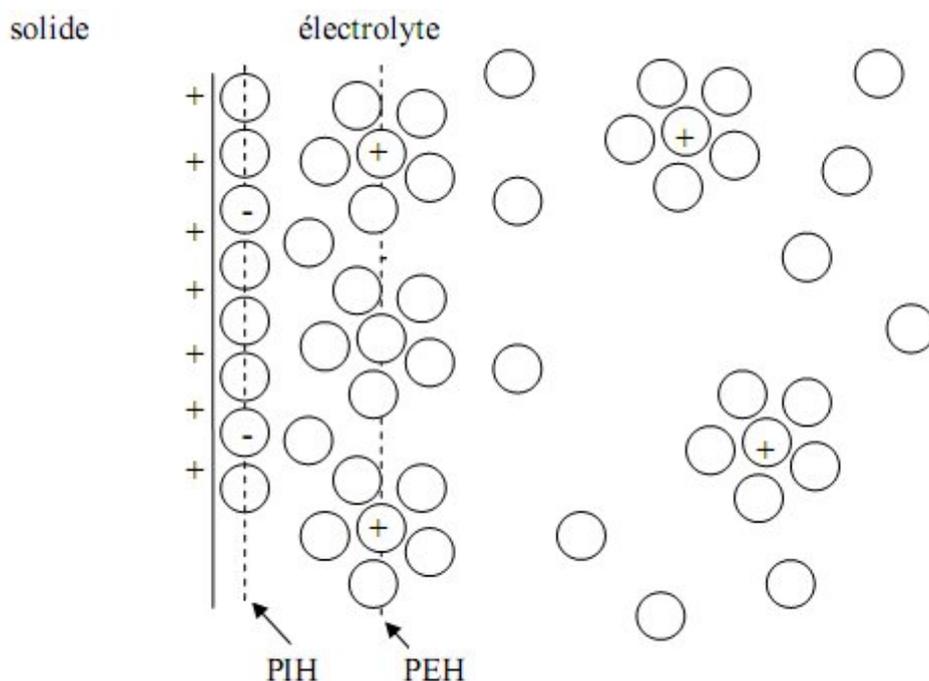


Figure I-15 : Redistribution des charges à l'interface solide/électrolyte [6].

La région la plus proche du solide, est appelée la couche interne, elle contient les ions spécifiquement adsorbés. Cette région s'étend jusqu'au plan interne d'Helmholtz (PIH), qui passe à travers le centre électrique des ions adsorbés. Elle s'appelle la première région. La deuxième région s'étale entre le PIH et le PEH, qui est le plan externe d'Helmholtz, il passe à travers le centre des ions solvatés. La troisième région s'appelle la couche diffuse. Elle s'étend du plan externe d'Helmholtz PEH jusqu'au volume de l'électrolyte.

II-2.1.3 Interface Electrolyte-Isolant-Solide (EIS)

Pour des structures EIS (Electrolyte-Isolant-Silicium), la double couche électrique a été décrite par un modèle appelé "Site-binding model" introduit en 1973 par Yates et al [17]. Ce modèle est basé sur l'existence de groupements à la surface de l'isolant. Leur nature est amphotère c'est-à-dire, que les groupes hydroxyles de la surface d'isolant peuvent être neutres, chargés positivement ou chargés négativement. Dans le cas du dioxyde de silicium SiO_2 , ce sont les groupes silanols (SiOH), qui causent la variation des charges de la surface d'oxyde lorsque le pH varie.

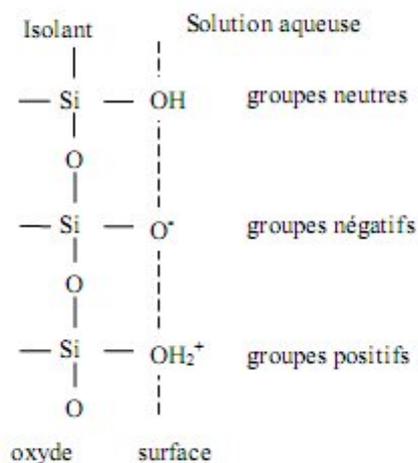
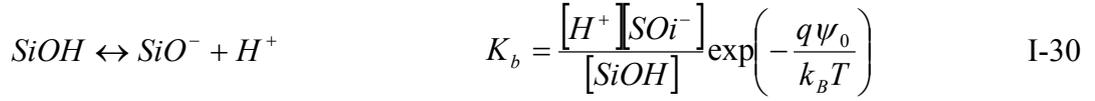
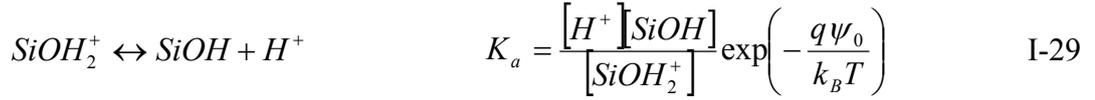


Figure I-16 : Présentation schématique de la théorie du modèle "Site-binding" [5].

L'arrangement des ions de la surface au volume de l'électrolyte détermine le potentiel de surface avec une dépendance des propriétés des groupes de surface et des charges de surface en fonction de la concentration d'électrolyte [17].

La réaction en surface est décrite comme :



Le potentiel de surface peut être calculé à partir de l'équation suivante [14] :

$$2.303(pH_{pzc} - pH) = \frac{q\psi_0}{k_B T} + \sinh^{-1}\left(\frac{q\psi_0}{\beta k_B T}\right) \quad I-31$$

Où, $pH_{pzc} = (pK_a + pK_b)/2$ est le pH au point de charge nulle, c'est-à-dire, quand il n'y a pas de charges sur la surface de l'isolant, et β est le terme correctif de l'ISFET donné par l'expression :

$$\beta = \frac{2q^2 N_s}{C_{DL} k_B T} \left(\frac{k_b}{k_a}\right)^{1/2} \quad I-32$$

Où, N_s est le nombre total de sites amphotères en surface d'isolant, C_{DL} est la capacité de double couche électrique.

L'équation (I-31) peut être linéarisée selon l'expression [2] :

$$\psi_0 = \frac{\beta}{\beta + 1} 2.303 \frac{k_B T}{q} (pH_{pzc} - pH) \quad I-33$$

La sensibilité d'un pH-ISFET est définie par la relation suivante :

$$S = \frac{d\psi_0}{d(pH_{pzc} - pH)} = 2.303 \left(\frac{k_B T}{q}\right) \frac{\beta}{\beta + 1} \quad I-34$$

II-3 Membranes sensible au pH

La sélectivité et la sensibilité chimique d'un capteur pH-ISFET sont limitées par les propriétés de l'interface électrolyte/isolant. Le premier isolant qui a été étudié pour la détection des ions H^+ est l'oxyde de silicium. Cependant, ce matériau a rapidement montré ses limites pour la mesure du pH. Sa sensibilité est subnernstienne ($<30mV/pH$, la valeur de sensibilité quasi-nernstienne est $55mV/pH$), avec des temps de réponse très long, et une faible durée de vie [21]. Pour cela, les recherches se sont tournées vers les structures

isolantes bicouches. En conservant l'oxyde de silicium SiO_2 vu ses qualités d'interface, et sa bonne tenue au claquage, on dépose sur cette couche d'autres matériaux ayant de meilleures propriétés d'interface pour la détection de l'ion H^+ . Les principales couches sensibles aux ions d'hydrogène sont :

- Le nitrure de silicium Si_3N_4 . C'est un matériau qui est bien connu et maîtrisé dans la technologie des circuits intégrés. La structure $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ est caractérisée par une réponse stable, rapide, une bonne linéarité, et une sensibilité quasi-ernstienne (entre 50-56 mV/pH). Généralement, la couche de Si_3N_4 est obtenue par un dépôt chimique en phase vapeur (LPCVD) [21-22].
- L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). Ce type de diélectrique permet d'obtenir une sensibilité satisfaisante variant entre 53-57 mV/pH [2], et des réponses faibles. Cependant son dépôt n'est pas compatible avec les technologies des circuits intégrés à la base de silicium.
- L'oxyde de tantale (Ta_2O_5). Cette couche diélectrique est caractérisée par un temps de réponse rapide de l'ordre de milliseconde [23], une bonne sensibilité qui varie entre 54 et 60 mV/pH. Les films de Ta_2O_5 sont plus performants que les films de SiO_2 et Si_3N_4 pour la fabrication de membranes sensibles aux ions H^+ [19]. L'inconvénient pour ces films est de ne pas être compatible avec les technologies des circuits intégrés. De plus ce matériau n'est pas sélectif aux ions potassium K^+ , calcium Ca^+ et sodium Na^+ [6].
- L'oxyde d'yttrium (Y_2O_3). Ce type de diélectrique est caractérisé par une bonne sensibilité varie autour de 56 mV/pH, plus résistant aux solutions de forte acidité, et un faible potentiel d'hystérésis. Le dépôt de cette membrane s'effectue par PVD (Physical Vapor Deposition) [25].
- L'oxyde de lanthanide (TiO_2). Il possède une sensibilité quasi-ernstienne environ 55mV/pH, chimiquement stable et insoluble, à l'exception des solvants de forte acidité. Le dépôt de diélectrique s'effectue par la méthode de pulvérisation [26].
- Le HfO_2 . C'est un nouveau matériau compatible avec les technologies CMOS, caractérisé par sa grande constante diélectrique, il présente une grande sensibilité

pour de faibles concentrations des ions H^+ . Le dépôt de ce matériau s'effectue par la technique PIAD (Plasma Ion Assisted Deposition) [27].

- L'oxynitride de silicium (SiO_xN_y). La sensibilité de ce type de matériau est liée au rapport NH_3/N_2O . par exemple, pour $NH_3/N_2O = 0.2$ la sensibilité est autour de 39mV/pH et pour $NH_3/N_2O = 2$ la sensibilité peut atteindre la valeur de 53mV/pH. Le dépôt de ce type de membrane s'effectue par LPCVD [2].
- Le PT. Ce matériau est conducteur. Il est caractérisé par une stabilité chimique, une grande résistivité, permittivité, et une sensibilité varie entre 53 et 57mV/pH. Cependant, le potentiel d'hystérésis est relativement élevé [28].

D'autres membranes sensibles aux ions H^+ ont été proposées pour remplacer le Si_3N_4 comme le WO_3 , ZrO_2 , et Gd_2O_3 , du fait de leurs grandes sensibilités. Par contre, la faible qualité d'interface limite leurs utilisations [29].

Les membranes organiques sont rarement utilisées pour la détection des ions H^+ . par contre elles sont utilisées d'une part pour la détection d'autres types d'ions tels que les ions K^+ , Ca^+ , Na^+ , NH_4^+ , et Cl^- , d'autre part pour la détection de molécules biologiques comme les enzymes par l'intermédiaire des technologies liées aux polymères. On peut citer comme exemple :

- ✓ Le polychlorure de vinyle (PVC). Ce polymère est chimiquement stable. Cependant, il peut être conducteur, donc il est nécessaire de réaliser des structures isolantes telles que $SiO_2/Si_3N_4/PVC$. Le PVC peut être utilisé pour la détection des enzymes.
- ✓ Polysiloxane (PSX). Une structure $SiO_2/Si_3N_4/PXS$ a été développée par I.Humenyk et al pour la détection de l'ion d'ammonium. Cette membrane est caractérisée par une bonne sensibilité. Néanmoins, le dépôt de cette membrane s'effectue par la méthode de microgoutte. Cette technique pose des problèmes de positionnement sur la grille de SiO_2/Si_3N_4 , elle est caractérisée par une non-reproductibilité, elle empêche donc l'obtention d'un processus industriel de fabrication pNH4-ISFET [30].

Conclusion

Un capteur chimique de type ISFET à une structure de base similaire à un transistor MOSFET, le rôle d'un capteur ISFET est défini à partir de sa couche chimiquement sensible. Donc, seules les propriétés chimiques des couches ionosensibles déterminent les caractéristiques du capteur chimique ISFET telle que la sensibilité et la sélectivité.

En plus de leur bonne sensibilité, leur temps de réponse court, l'avantage majeur de ce type de capteur est la compatibilité avec la technologie de fabrication de silicium, on peut intégrer sur une même puce plusieurs capteurs pour différentes détections d'ions, grâce aux techniques de production collective de la microélectronique.

Chapitre II

*Simulation des étapes technologiques de
réalisation du capteur chimique ISFET
par ATHENA*

Introduction

Les transistors chimiques à effet de champ sont des capteurs qui transforment les grandeurs chimiques en un signal électrique. L'utilisation des technologies de la microélectronique pour la réalisation de ces capteurs donne une possibilité d'intégration et une production à faible coût. Les simulateurs TCAD (Technology Computer-Aided Design) permettent la modélisation du comportement physique et électrique d'un composant électronique, dans le but d'économiser le temps et le coût de développement, et ainsi de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs. Les simulateurs existants sur le marché (ISE, SYNOPSIS, SILVACO,...) ont le même principe de fonctionnement. Dans ce travail, nous avons utilisé le simulateur TCAD-SILVACO (ATHENA et ATLAS).

Dans ce chapitre, nous présenterons le logiciel de simulation TCAD-SILVACO, son principe de fonctionnement, et ces modules de simulation : ATHENA pour la simulation des processus technologiques, et ATLAS pour la simulation du comportement électrique des composants. Puis, nous ferons une description des différentes étapes de simulation du procédé technologique telles que l'oxydation, la diffusion, la gravure, etc.

I- Conception par simulation (TCAD-SILVACO) du capteur ISFET

I-1. Présentation du logiciel TCAD-SILVACO

SILVACO (Silicon Valley Corporation) est un environnement de logiciels qui permet de concevoir et prévoir les performances des dispositifs à semi-conducteur. Cet outil sert à la modélisation des dispositifs à semi-conducteur avant leur fabrication. Il est très utile dans le développement de beaucoup de projets de recherches. Le TCAD-SILVACO inclut de nouveaux modèles physiques qui emploient des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, de nouvelles techniques de maillage, l'optimisation des solutions linéaires, etc, tout en permettant d'obtenir des résultats de simulation très proches de celles de la pratique. L'avantage majeur de ce type de simulateurs est qu'il donne la possibilité de visualiser des phénomènes physiques difficilement accessibles et donc observables. Les modules de TCAD-SILVACO peuvent être utilisés pour :

- La simulation des étapes de fabrication technologique tels que, ATHENA, SSupreme3, SSupreme4, etc.

- La simulation électrique des dispositifs tels que, les Diodes, les MOSFET, les transistors bipolaires..., réalisée par le module ATLAS.
- Virtual Wafer Fab pour automatiser la simulation de fabrication des Wafers.

Dans cette étude, les simulations sont effectuées par les deux modules ATHENA, et ATLAS.

I-1.1 Bases physiques du principe de fonctionnement du simulateur TCAD-SILVACO

I-1.1.1 Equations de bases de la physique des semi-conducteurs

De façon très succincte, nous pouvons dire que ce simulateur de dispositifs est basé sur la résolution simultanée de l'équation de Poisson et de l'équation de continuité. Il calcule à chaque instant et en tout point de l'espace en une suite d'éléments finis, la concentration des électrons et des trous et la valeur du potentiel électrostatique [31]. L'équation de Poisson montre une relation entre le potentiel et la densité des porteurs :

$$\varepsilon\Delta V = -q(p - n + N_D^- - N_A^+) \quad \text{II-1}$$

Où ε est la constante diélectrique, V le potentiel, ΔV le Laplacien du potentiel, q est la charge élémentaire d'électrons, N_D^- et N_A^+ sont les concentrations des dopants donneurs et accepteurs ionisées, n et p sont les densités des porteurs.

L'évolution temporelle des densités de porteurs obéit aux équations de continuité pour les électrons et les trous :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - U_n + \frac{1}{q} \text{div} \vec{j}_n \quad \text{II-2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - U_p - \frac{1}{q} \text{div} \vec{j}_p \quad \text{II-3}$$

Où G et U sont respectivement les taux de génération et de recombinaison des porteurs, j_n et j_p sont les densités de courant des électrons et des trous respectivement.

Les dérivations basées sur la théorie de transport de Boltzmann ont prouvé que la densité des courants dans les équations de continuité peut être définie par le modèle

d'entraînement-diffusion. Les densités de courants sont exprimées en deux termes. Le premier correspond à l'entraînement des charges par le champ électrique, le second correspond à la diffusion des porteurs.

$$\vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E} + qD_n \overrightarrow{\text{grad}n} \quad \text{II-4}$$

$$\vec{J}_p = qp\mu_p \vec{E} - qD_p \overrightarrow{\text{grad}p} \quad \text{II-5}$$

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}V} \quad \text{II-6}$$

Où D_n , et D_p sont les coefficients de diffusion. Ils sont directement reliés aux mobilités des porteurs par la relation d'Einstein :

$$D_n = \frac{KT}{q} \mu_n \quad \text{II-7}$$

$$D_p = \frac{KT}{q} \mu_p \quad \text{II-8}$$

Les modèles physiques dans les semi-conducteurs ont été modélisés sous la forme d'expressions mathématiques reliant le potentiel électrostatique et la densité des porteurs. La modélisation physique est réalisée en tenant compte de la probabilité d'occupation des niveaux d'énergie, de la mobilité des porteurs et des différents types de recombinaison-génération. Plusieurs modèles ont été développés pour les semi-conducteurs en fonction du choix de la technologie (bipolaire, CMOS,...), de la concentration des dopants, des dimensions et de la température de fonctionnement. Ces grandeurs doivent être choisies d'une manière judicieuse pour se rapprocher du comportement physique réel du dispositif. Les modèles physiques de TCAD utilisés dans cette étude sont les modèles de Monté Carlo, de Pearson, de Fermi, de Lombardi, de Fermi-Dirac et de SRH (Shockley Read Hall). Ces modèles vont être détaillés dans les paragraphes suivants.

I-1.1.2 Modèles physiques utilisés

Pour l'ensemble des simulations TCAD effectués dans cette étude, le logiciel fait appel à différents modèles physiques (cité sous-dessous), qui sont être utilisés à chaque étape technologique considérée.

✓ **Le modèle Monte Carlo (pour la simulation technologique de dépôt des matériaux)**

Ce modèle physique a été utilisé dans la simulation des étapes de fabrication technologiques (procédé de dépôt et gravure des matériaux)

Le modèle de Monte Carlo a été employé pour simuler le procédé de dépôt par la méthode de LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) [32].

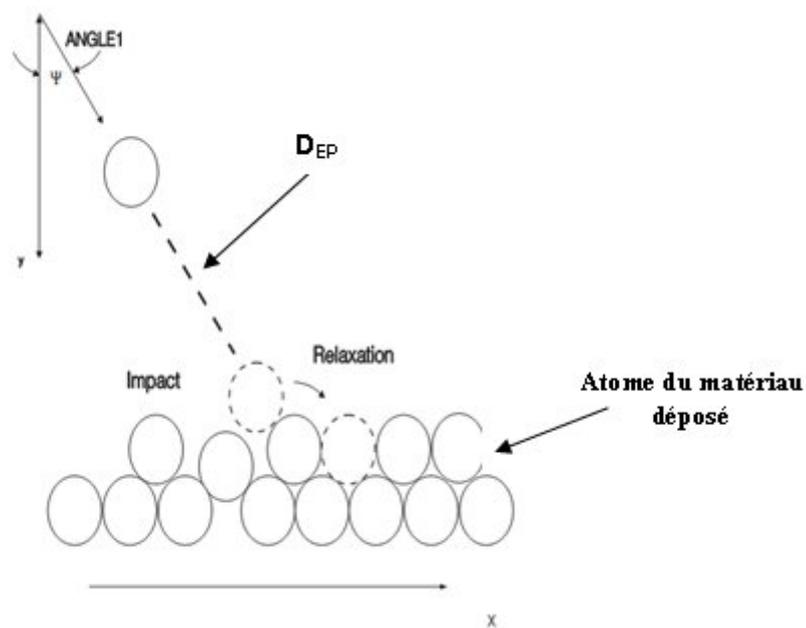


Figure II-1 : Dépôt d'un matériau par le modèle de Monte Carlo [32].

Le modèle emploie une approche analytique pour calculer la diffusion en surface de la distribution gaussienne normalisée [32].

$$n_D = \exp\left(-\frac{x^2}{D_{EP}^2}\right) \quad \text{II-9}$$

Où n_D est la distribution gaussienne normalisée, x le point de contact avec la surface, et D_{EP} est le rayon d'incidence.

✓ **Le modèle Monte Carlo (pour la simulation technologique de la gravure des matériaux)**

C'est un modèle de traitement complet qui utilise la simulation de la gravure par plasma impliquant la distribution du plasma et l'interaction des particules de plasma avec les matériaux du substrat [32].

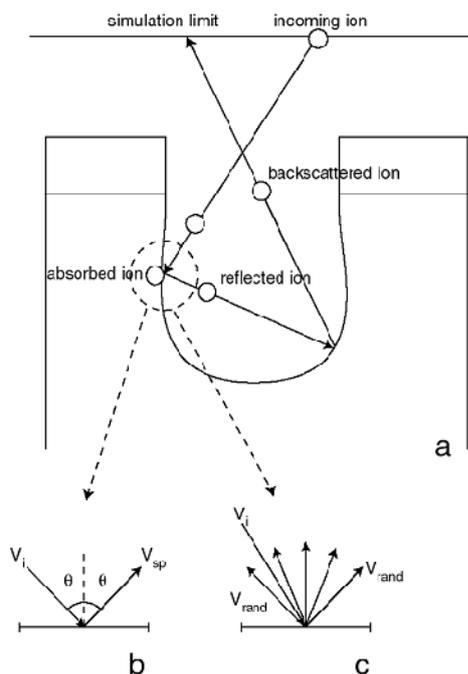


Figure II-2 : Diagramme de flux de plasma (a), réflexion spéculaire (b), et réflexion aléatoire (c) [32].

L'interaction des ions avec la surface du matériau est gouvernée par deux facteurs. Le premier est le coefficient de réflexion P_{ref} . Le second facteur est la rugosité de la surface R . Les deux facteurs dépendent de la surface du matériau et la nature d'ion. Le coefficient de réflexion détermine la probabilité de la particule de se réfléchir sur la surface et la rugosité détermine comment l'ion est réfléchi. Si $R=0$ la réflexion est spéculaire (figure II-8, b), lorsque $R=1$ la réflexion est aléatoire avec une distribution angulaire uniforme (figure II-8, c).

$$v_{ref} = 0 \text{ (l'ion est absorbé)} \quad \text{II-10}$$

$$v_{ref} = v_{sp} \cdot (1 - R) + v_{rand} \cdot R \quad \text{II-11}$$

Où :

- v_{sp} : vitesse de l'ion après une réflexion spéculaire ;
- v_{rand} : vitesse de l'ion après une réflexion aléatoire ;

✓ **Le modèle de Pearson (pour la simulation technologique de l'implantation ionique)**

La méthode utilisée dans ce travail pour la simulation de l'implantation ionique par le logiciel ATHENA de TCAD-SILVACO est une méthode analytique. Les modèles analytiques sont : le modèle Gaussien, le modèle de Pearson, et le modèle de Dual Pearson. D'une façon générale, la distribution gaussienne est inadéquate parce que dans la plupart des cas, les profils réels sont asymétriques, pour cette raison la méthode la plus simple et la plus approuvée pour le calcul des profils asymétriques d'implantation ionique est la distribution de Pearson [32, 33].

✓ **Le modèle de Fermi (pour la simulation technologique de la diffusion)**

Ce modèle est utilisé par TCAD lors de l'étape de la diffusion des dopants (redistribution) durant le recuit thermique. L'avantage principal de ce modèle est sa vitesse de simulation [32].

✓ **Le modèle de Lombardi (pour la simulation électrique)**

La mobilité des porteurs (électrons et trous) dépend du champ électrique qui accélère les électrons et les trous, la température du réseau et la concentration des dopants. La dégradation de la mobilité se produit à l'intérieur des couches d'inversion. Cet effet est simulé dans ATLAS à l'aide de trois méthodes distinctes :

- ✓ Modèle de dégradation surfacique SURFMOB
- ✓ Modèle de champ électrique transverse SHIRAHATA
- ✓ Modèle spécifique de la mobilité de la couche d'inversion CVT, YAMAGHCHI, TASCH.

Les modèles CVT, YAMAGHCHI, et TASCH sont conçus en tant que modèles autonomes qui incorporent tous les effets requis pour simuler la mobilité des porteurs.

La modélisation de la mobilité la plus complète est basée sur le modèle de Lombardi. C'est un modèle de mobilité qui prend en compte la variation de la mobilité avec le champ électrique, la concentration de dopants et la température. Ce phénomène est introduit par le simulateur en ajoutant CVT dans la commande MODELS [34].

✓ **Le modèle Sockley-Read-Hall (recombinaison-génération)**

Lorsque le semi-conducteur subit une perturbation par exemple l'impact d'un ion, cette excitation introduit une génération de paires électrons/trous. Ensuite, le système revient à l'état d'équilibre par le processus de recombinaison. La simulation par ATLAS prend en compte les recombinaisons SRH sur des niveaux profonds. Le taux de recombinaison est donné par l'expression suivante :

$$U_{SRH} = \frac{n \cdot p - n_i^2}{\tau_p \cdot \left(n + n_i \exp\left[\frac{E_{trap}}{KT_L}\right]\right) + \tau_n \cdot \left(p + n_i \exp\left[-\frac{E_{trap}}{KT_L}\right]\right)} \quad \text{II-12}$$

Où E_{trap} est la différence entre le niveau d'énergie du piège et le niveau de Fermi intrinsèque, T_L est la température du réseau en degrés Kelvin, et τ_n , τ_p les durées de vie respectives des trous et des électrons. Le modèle de résolution numérique de ce phénomène est activé dans le programme de simulation en ajoutant le mot clé SRH à la commande MODELS [34].

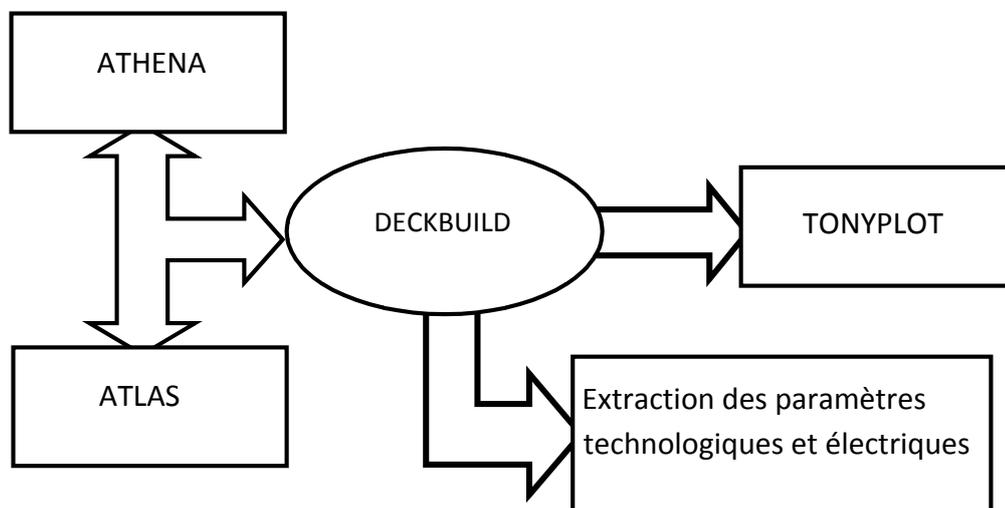
Paramètres	Valeur par défaut
E_{trap}	0 eV
τ_n	10^{-7} S
τ_p	10^{-7} S

Tableau 1 : Valeurs des paramètres utilisés dans l'équation (II-12).

I-1.2 Le logiciel ATHENA

Le logiciel de simulation ATHENA de TCAD-SILVACO fournit des possibilités générales pour la simulation des processus utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs : diffusion, oxydation, implantation ionique, gravure, lithographie, procédés de dépôt. Il

permet des simulations rapides et précises de toutes les étapes de fabrication utilisées dans la technologie CMOS, bipolaire, SOI, optoélectronique, MEMS, et les composants de puissances [35]. Là aussi, le logiciel permet de fournir des informations importantes pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques telles que les concentrations des porteurs, les profondeurs de jonctions, etc. Le programme de simulation (défini comme entrée) des différentes étapes technologiques et les phénomènes physiques, s'établi avec le module DECKBUILD de TCAD-SILVACO, puis la visualisation de la structure de sortie s'effectue avec le module TONYPLOT.



II-3 : Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD-SILVACO

- **DECKBUILD**

Le DECKBUILD est l'environnement où est défini le programme de simulation à travers des commandes spécifiques. De multiples simulateurs considérés comme des entrées peuvent être utilisés avec le DECKBUILD : ATHENA, ATLAS, SSUPREM3, etc. L'affichage des résultats de simulation tels que les paramètres technologiques (profondeur de jonction, concentration des porteurs) et même les paramètres électriques (tension de seuil, courant, etc.) est effectué à l'aide d'une fenêtre d'information (Output window).

- **TONYPLOT**

TONYPLOT est l'environnement où sont visualisés les résultats des simulations. Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des

caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil de dopage, et caractéristiques électriques). Selon le programme de simulation, TONYPLOT peut donner des caractéristiques de sortie en une dimension (1D), deux dimensions (2D), ou trois dimensions (3D). Dans ce mémoire, nous présenterons les résultats de la simulation en deux dimensions, comme c'est illustré sur la figure II-4, à titre d'exemple.

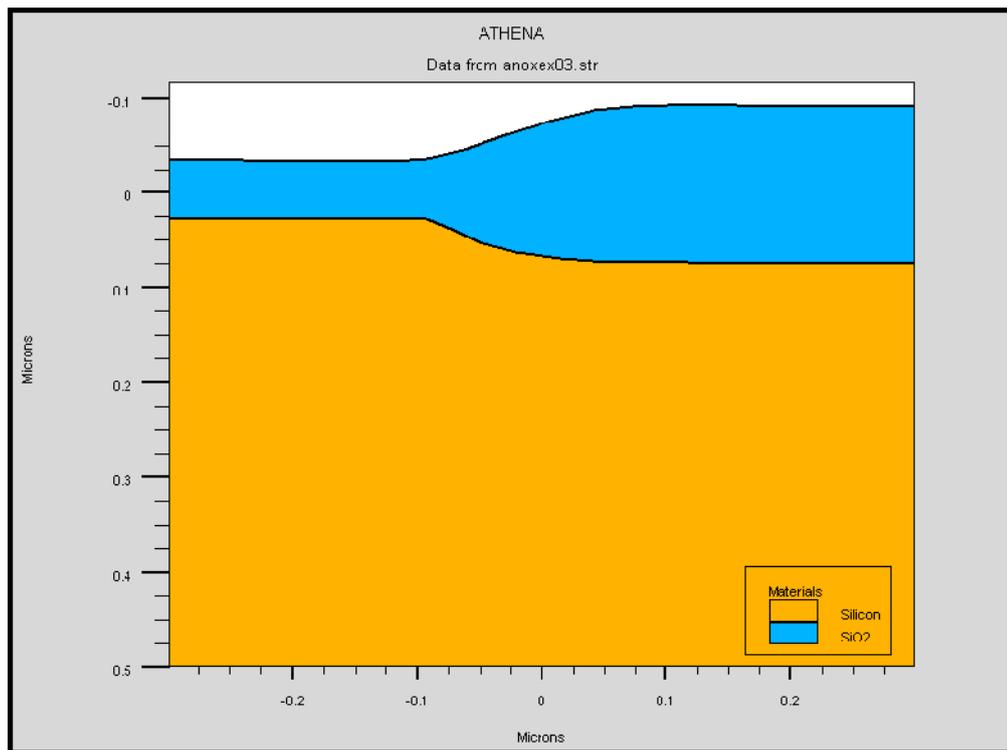


Figure II-4 : Exemple de simulation en 2D de l'étape d'oxydation sous ATHENA.

I-1.3 ATLAS

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel. En plus du comportement électrique "externe", il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel. Ceci est réalisé en résolvant numériquement l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et des trous (à deux dimensions) en un nombre fini de points formant le maillage de la structure défini par l'utilisateur ou par le programme. Ce simulateur est composé de deux parties :

- une partie traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...),
- une partie formée des modèles physiques des composants semi-conducteurs les plus courants : modèles de recombinaison (Shockley Read Hall), d'ionisation par impact (Pearson et Monte Carlo), ainsi que les modèles de mobilité, et les statistiques de Fermi-Dirac et Boltzmann.

La figure II-5 indique, à titre d'exemple, la caractéristique courant-tension pour un transistor bipolaire simulé par ATLAS.

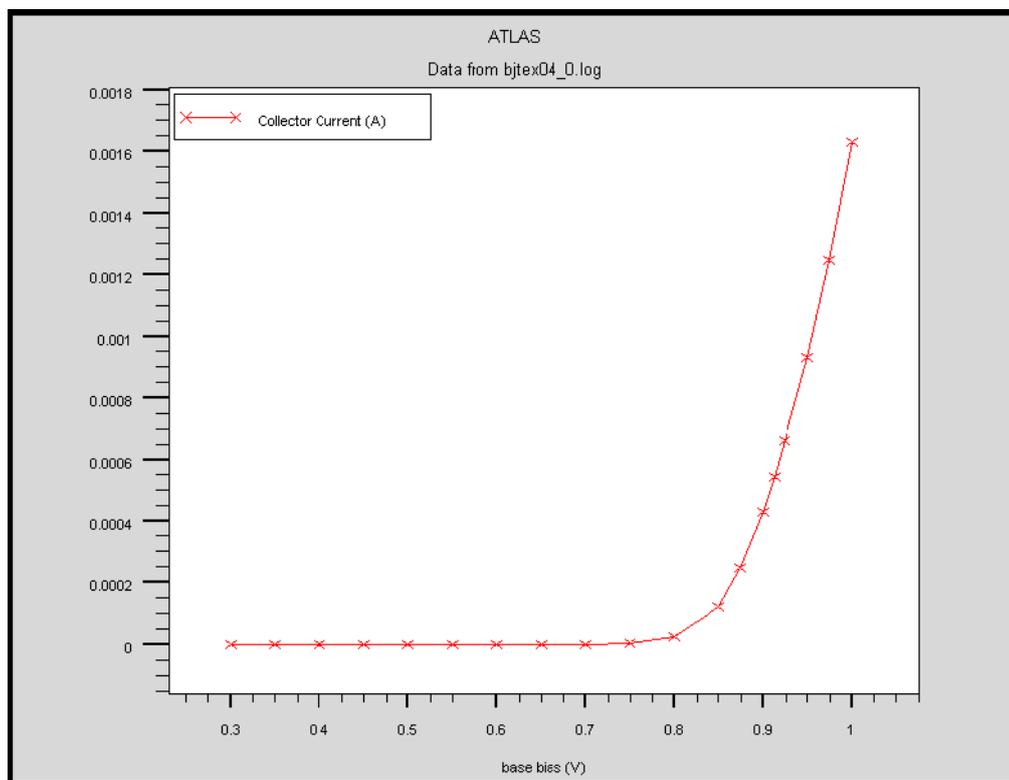


Figure II-5 : Exemple de simulation par ATLAS : caractéristique de courant de collecteur en fonction de la tension de base d'un transistor bipolaire.

II- Cahier des charges

Une étude bibliographique portant sur différentes structures de capteurs ISFET's [6,36,37,38,39] nous a permis de fixer notre choix sur un dispositif de capteur de type MOSFET canal N à membrane ionosensible à base de nitrure de silicium Si_3N_4 comme indiqué sur la figure II-6. Cette membrane Si_3N_4 a la propriété de capter les ions H^+ en solution hydrophile

L'objectif de ce travail est de faire une conception par simulation, sous ATHENA et ATLAS, d'un capteur chimique ISFET similaire à un MOSFET à canal N. Pour définir les paramètres technologiques nécessaires à la simulation, tels que les épaisseurs des couches isolantes, la longueur de la grille, la profondeur des jonctions, ainsi que certains paramètres électriques, nous nous sommes basés sur des valeurs trouvées dans la littérature, concernant l'étude de différentes structures des capteurs chimiques.

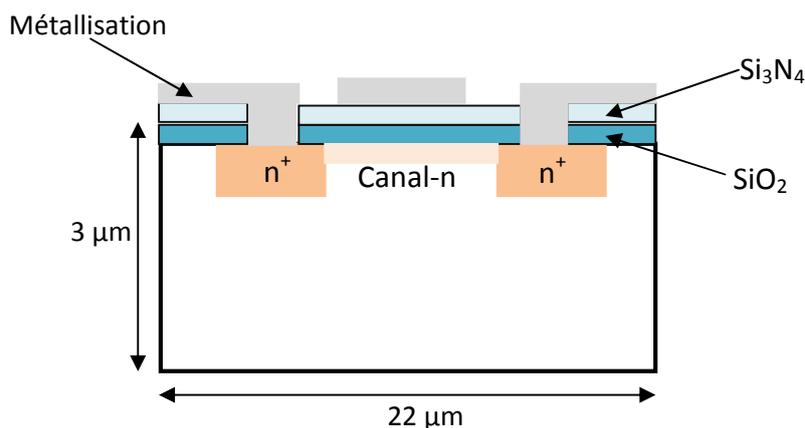


Figure II-6 : Schéma d'un à structure MOSFET canal N.

D'un point de vue pratique, l'un des avantages primordiaux des capteurs chimiques de type ISFET, est la compatibilité avec les techniques de fabrication standard MOS. Les efforts récents ont été orientés vers l'amélioration de la technologie de fabrication et la production en masse des ISFET [40]. Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre I, la structure d'un dispositif ISFET est similaire à celle d'un MOSFET. La plupart des capteurs chimiques fonctionnent comme des dispositifs en mode d'appauvrissement [36]. Donc la stratégie de conception va être basée sur la simulation d'un MOSFET à canal préformé (transducteur électrique du capteur ISFET). Pour un transistor MOS à canal préformé, la tension de seuil est liée au niveau de dopage dans le canal mais principalement à son profil proche de la surface. La tension de seuil d'un transistor MOS peut être ajustée avec précision en utilisant l'implantation ionique. Cette méthode de dopage consiste à bombarder un échantillon de matériau avec des ions de l'impureté désirée et à des énergies variant de quelque Kilo-électronvolts à quelques Méga-électronvolts. La profondeur de pénétration des ions dans un échantillon est proportionnelle à l'énergie de bombardement. Nous avons calculé théoriquement la dose d'arsenic implanté à partir de la relation suivante [6] :

$$V_T(imp) = V_T(0) + \frac{q \cdot D}{C_G} \quad \text{II-13}$$

Où

D : dose d'implantation pour ajuster la tension de seuil ;

q : charge d'électron ;

C_G : la capacité de grille.

La grille est composée de deux couches de diélectriques : le nitrure de silicium Si_3N_4 et l'oxyde de silicium SiO_2 , la capacité de grille est donnée par l'expression [6] :

$$C_G = \frac{C_{\text{SiO}_2} \times C_{\text{Si}_3\text{N}_4}}{C_{\text{SiO}_2} + C_{\text{Si}_3\text{N}_4}} = \left[\frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{SiO}_2} \cdot \varepsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4}}{t_{\text{SiO}_2} \cdot \varepsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4} + t_{\text{Si}_3\text{N}_4} \cdot \varepsilon_{\text{SiO}_2}} \right] \quad \text{II-14}$$

Où :

ε_0 : Permittivité diélectrique du vide ;

$\varepsilon_{\text{SiO}_2}$: Permittivité diélectrique de l'oxyde de silicium = 3.9 ;

$\varepsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4}$: Permittivité diélectrique du nitrure de silicium ;

t_{SiO_2} : Épaisseur de l'oxyde de silicium;

$t_{\text{Si}_3\text{N}_4}$: Épaisseur du nitrure de silicium.

$$C_G = \frac{C_{\text{SiO}_2} \times C_{\text{Si}_3\text{N}_4}}{C_{\text{SiO}_2} + C_{\text{Si}_3\text{N}_4}} = \left[\frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{SiO}_2} \cdot \varepsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4}}{t_{\text{SiO}_2} \cdot \varepsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4} + t_{\text{Si}_3\text{N}_4} \cdot \varepsilon_{\text{SiO}_2}} \right] \quad \text{II-15}$$

$$|D| = \frac{(V_T(imp) - V_T(0)) \times C_G}{q} \quad \text{II-16}$$

Quelques ordres de grandeurs de ces paramètres choisies d'après notre étude bibliographique et selon les travaux d'I. Humenyuk et D. Tomaszewski [6,36] :

Les paramètres technologiques

- L'épaisseur des films diélectriques $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$: 65 nm pour chacune des deux couches ;
- La longueur de grille : 16 μm ;
- La profondeur des jonctions source/drain $X_{jS/D} = 1.5 \mu\text{m}$.

Les paramètres électriques

- La tension de seuil $V_T = -1\text{V}$;
- La polarisation électrique : $V_G \leq 2\text{V}$ et $V_D \leq 1\text{V}$;

En tenant compte de ces paramètres technologiques et électriques, et à partir de l'équation (II-16), la valeur théorique de la dose d'implantation est $D = 2.2 \cdot 10^{11} \text{ at/cm}^2$.

III- Simulation en 2D de dispositifs sous ATHENA

Le procédé technologique est simulé à l'aide du module ATHENA, chaque étape de fabrication utilise un modèle physique pour la simulation des phénomènes réels existants dans le processus de fabrication réel. Cependant pour l'ISFET qui n'est pas un composant conventionnel, la difficulté avec l'outil TCAD est de ne pas pouvoir simuler l'interface électrolyte/isolant, ainsi que le comportement du pH de l'électrolyte [41]. Pour cette raison, nous nous sommes intéressés à la simulation de ce dispositif en tant que MOSFET qui peut être considéré comme le transducteur électrique de l'ISFET.

III-1 Description du procédé technologique

Une étape très importante et indispensable qui doit être effectuée avant d'entamer la simulation du procédé technologique est le maillage du dispositif.

III-1.1 Maillage du dispositif

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bonnes simulations. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats. La méthode numérique utilisée pour résoudre les équations physiques est la méthode des éléments finis. Son principe de base est la discrétisation par éléments des équations à traiter. Les éléments qui définissent la maille élémentaire utilisée par le simulateur sont des prismes. Pour obtenir des résultats fiables et précis, la finesse du maillage doit être définie

en fonction des variations des grandeurs physiques. Le choix de maillage doit être fait de façon à avoir un compromis entre la vitesse d'exécution et l'exactitude des résultats [42]. Le maillage doit être très fin pour les régions telles que la région du canal, les jonctions drain/ substrat et source/substrat, alors qu'il peut être moins serré pour d'autres régions du transistor, en dehors de ces zones actives. La maille conçue pour notre dispositif est montrée sur la figure II-7 ci-dessous.

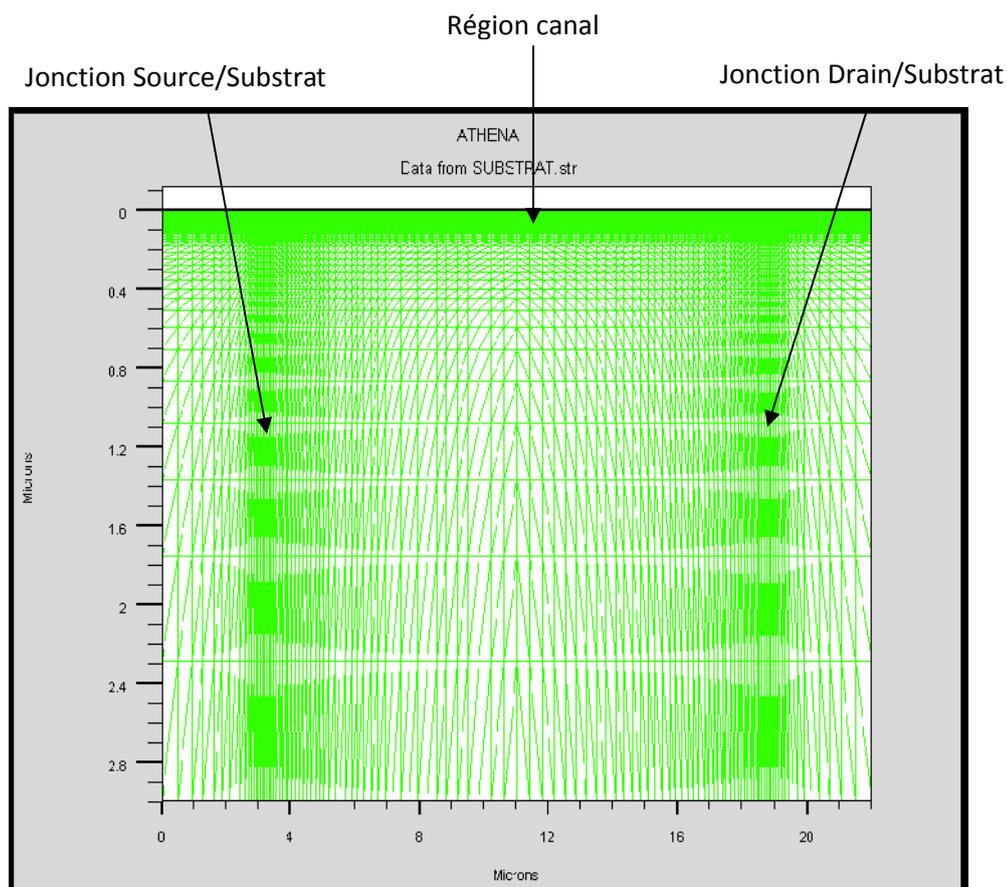


Figure II-7 : Maillage du dispositif.

III-1.2 Choix du substrat

Avant de réaliser tout composant microélectronique, il faut définir le substrat, c'est-à-dire le matériau dans lequel sera réalisé le dispositif.

Les capteurs ISFET peuvent être fabriqués à partir de plusieurs types de substrats tels que les wafers de silicium, les verres en pyrex, et les céramiques [43]. Dans notre cas, le choix est porté sur un substrat silicium de type p (dopé Bore) où la mobilité des électrons

minoritaires est trois fois plus grande que celle des trous pour la conduction dans le futur canal du transistor.

Comme dans tout processus de réalisation de transistor MOS, le substrat doit être peu dopé, l'orientation cristallographique des plaquettes est généralement l'axe $\langle 100 \rangle$, qui assure une meilleure qualité d'oxyde de grille [6]. Concernant le dopage du substrat, nous prenons $N_a=10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

III-1.3 Phase 1 : dépôt d'oxyde de pré-implantation

Cette opération a pour but de faire déposer une couche mince de dioxyde de silicium SiO_2 avec une épaisseur de 50 nm. Afin de limiter la création de défauts dans le silicium à travers cette couche, nous allons implanter une dose d'impuretés de dopants d'Arsenic à travers cette couche pour créer les zones actives source et drain du composant. Le choix des grandeurs technologiques a été fixé après plusieurs simulations en tenant compte du cahier des charges préalablement établi.

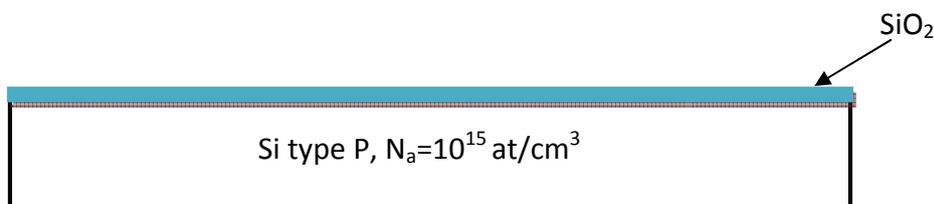


Figure II-8 : Dépôt d'oxyde de pré-implantation

III-1.4 Phase 2 : Formation des zones actives source et le drain

La première étape consiste à faire un dépôt de résine de protection d'une épaisseur de $2 \mu\text{m}$ sur la couche d'oxyde de pré-implantation.

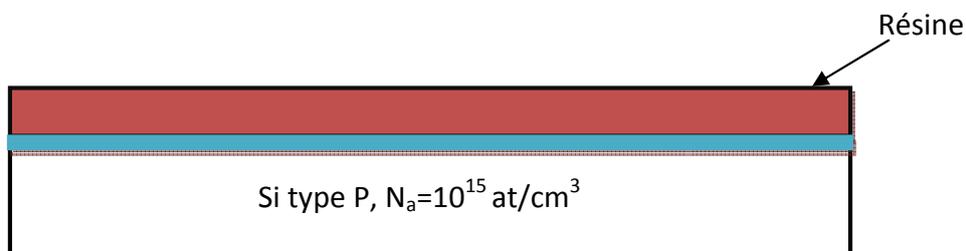


Figure II-9 : Dépôt de la résine protectrice

L'ouverture des fenêtres des caissons source et drain exige une opération de gravure de la résine, simulée en utilisant le modèle de Monté Carlo [6].

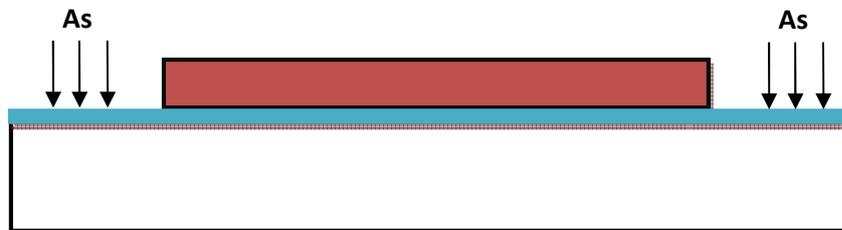


Figure II-10 : Ouverture des fenêtres de la source et drain

Les zones actives des dispositifs sont réalisées par l'implantation ionique avec une dose d'implantation d'arsenic de $5.4 \cdot 10^{14}$ at/cm² et une énergie de 100 keV à travers un oxyde de pré-implantation et une résine de protection déposée sur la région de la grille du composant. Le choix des grandeurs technologiques a été fixé après plusieurs simulations en tenant compte de la profondeur de jonction et de la concentration d'ions d'arsenic des zones actives (source et drain). L'angle de bombardement utilisé dans cette simulation est égal à 7° .



Figure II-11 : Formation des régions source et de drain N⁺.

La figure II-12 montre que la concentration d'impuretés d'arsenic dans les zones actives (source et drain) est plus élevée en surface qu'en volume (de l'ordre de 10^{20} at/cm³ près de la surface).

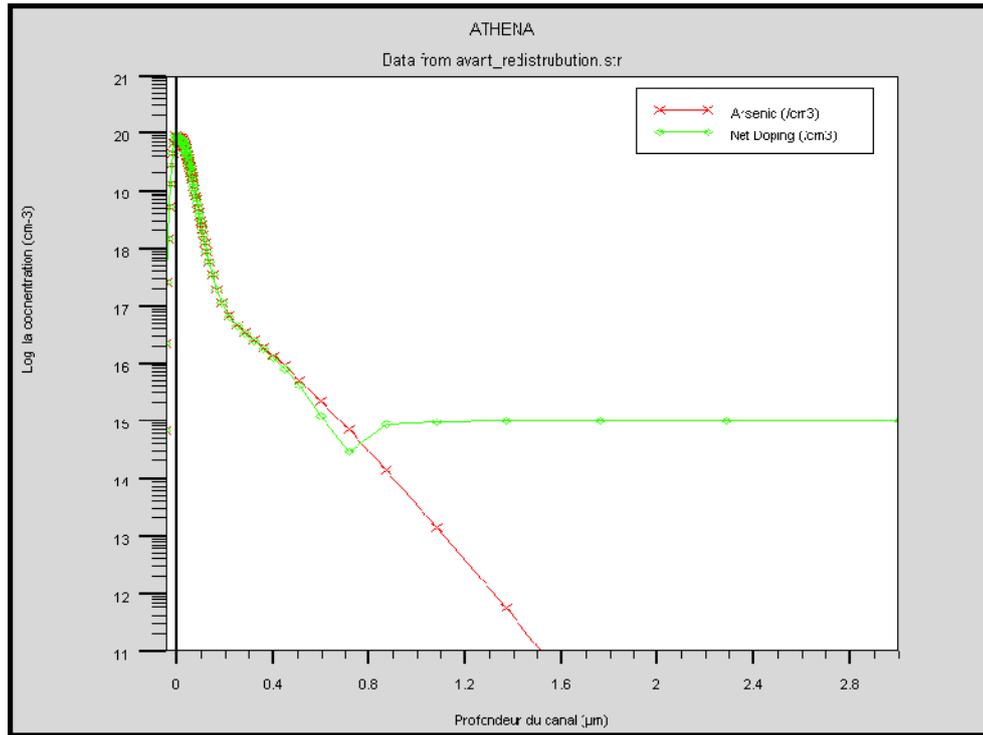


Figure II-12 : Profil de distribution des ions d'arsenic implantés dans le substrat (1D), avant recuit.

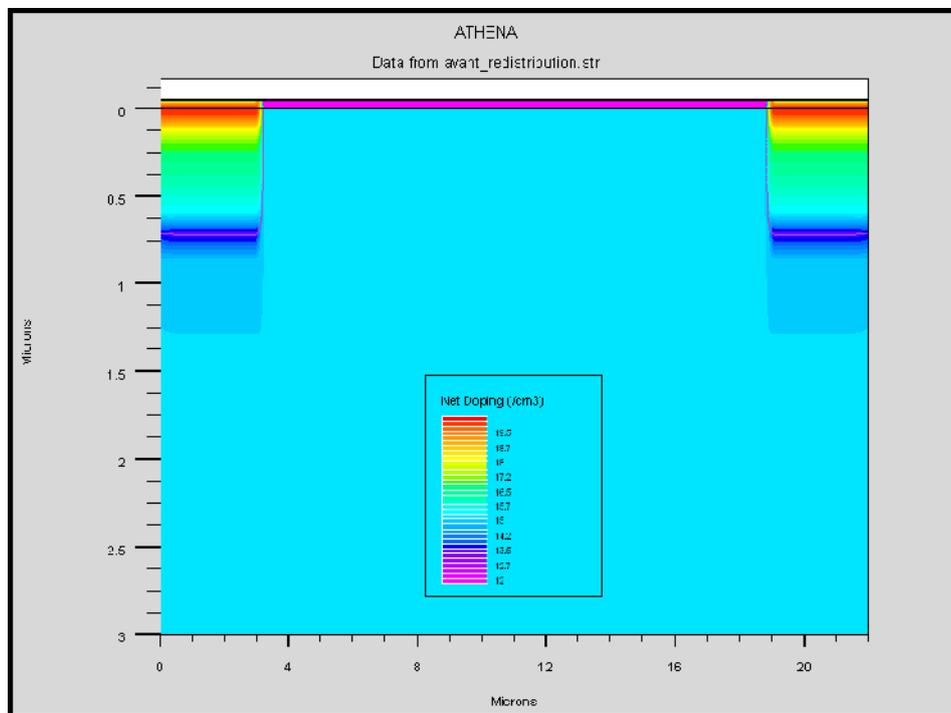


Figure II-13 : Structure bidimensionnelle simulée par ATHENA avant redistribution.

III-1.5 Phase 3 : étape de redistribution (recuit thermique isotherme)

Cette étape thermique permet d'homogénéiser le dopage, redistribuer les atomes d'arsenic profondément dans le silicium, diminuer les effets de surface et de corriger les défauts cristallins, et surtout activer électriquement les atomes dopants qui doivent se placer en position substitutionnelle dans le réseau cristallin du silicium [5].

En jouant sur le temps et la température, nous avons établi un cycle thermique pour optimiser la concentration des ions d'arsenic et les profondeurs des jonctions des zones actives (source et drain).

Le profil thermique de la redistribution est décrit dans la figure II-14

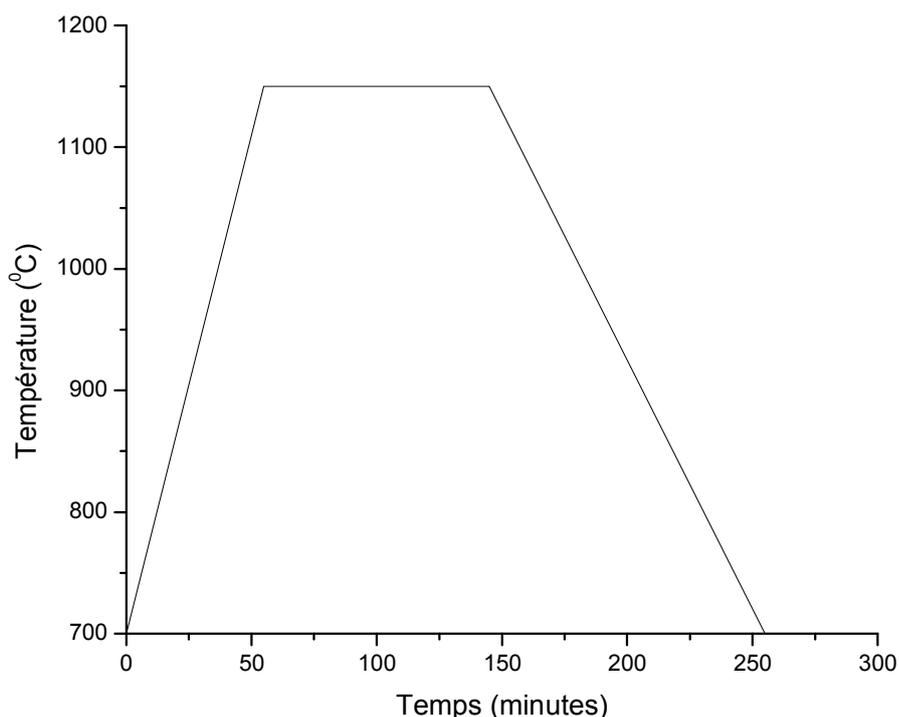


Figure II-14 : Cycle thermique de redistribution des atomes implantés sous atmosphère inerte d'azote.

En sachant que le recuit est réalisé sous atmosphère inerte d'azote, nous avons effectué une montée de température de 700 °C jusqu'à 1150 °C pendant 55 minutes. Puis, le recuit isotherme a été maintenu pour une température de 1150 °C pendant 90 minutes.

Enfin, nous avons effectué une descente de température jusqu'à la température initiale pendant 110 minutes.

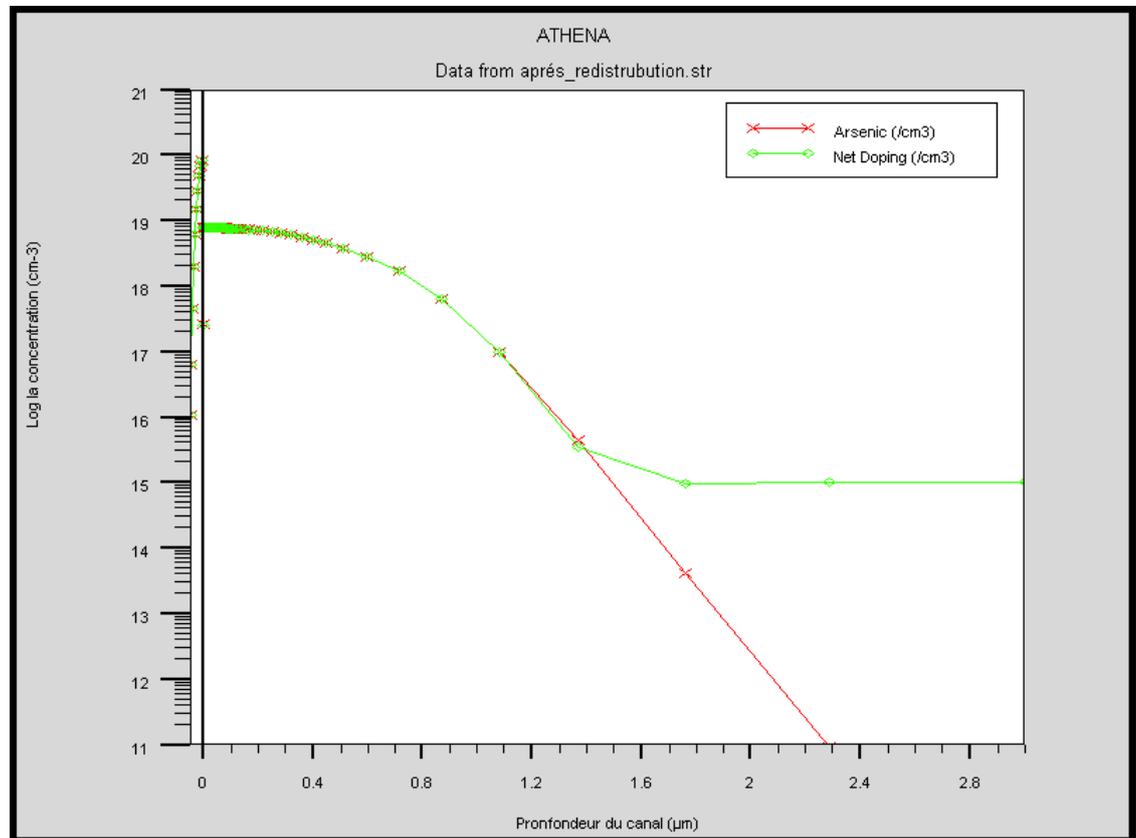


Figure II-15 : Profil de dopage des ions d'arsenic après l'étape de redistribution durant le recuit (1D).

En se basant sur le fait que le profil de redistribution des ions d'arsenic dans le silicium est un profil Gaussien [6], la figure II-15 montre une diminution de la concentration d'impuretés d'arsenic en surface dans les régions source et drain, et une augmentation des profondeurs de jonctions. Une coupe de la structure simulée en 2D par ATHENA des zones actives après recuit est montrée sur la figure II-16.

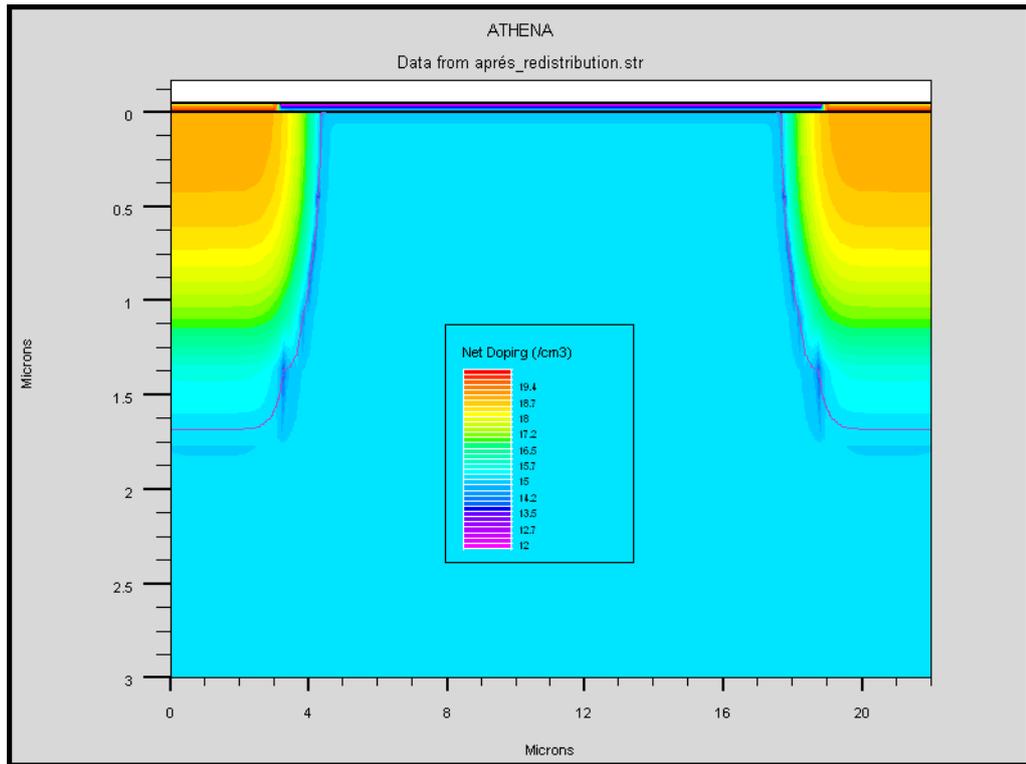


Figure II-16 : Structure bidimensionnelle simulée par ATHENA après redistribution.

III-1.6 Phase 4 : formation du canal

La première opération consiste à graver l'oxyde de silicium précédemment formé sur la face avant de substrat pour créer un oxyde de pré-implantation destiné à la formation du canal.

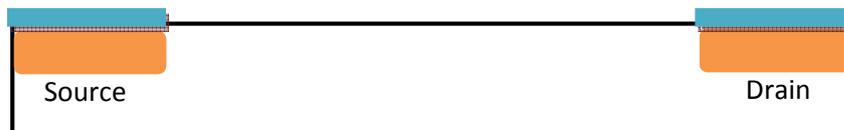


Figure II-17 : Gravure de l'oxyde précédemment formé.

Après l'ouverture d'une fenêtre de grille, nous avons effectué un dépôt d'une couche mince d'oxyde de pré-implantation à travers laquelle les ions d'arsenic vont être implantés dans le canal. La couche de résine déposée (figure II-18) joue le rôle de la couche protectrice des zones actives N^+ .

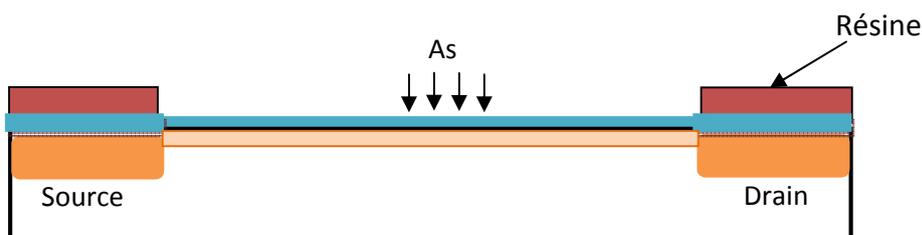


Figure II-18 : Implantation des ions d'arsenic dans le canal

L'opération suivante consiste à graver la résine et la couche d'oxyde de pré-implantation. Cette dernière contient beaucoup de défauts dus à l'implantation ionique. L'optimisation des paramètres technologiques concernant la formation du canal sera décrite dans le chapitre suivant.

III-1.7 Phase 5 : formation de l'oxyde de grille

L'oxyde de grille a été réalisé en utilisant une oxydation thermique sèche du silicium. Ce dernier assure la croissance d'une couche d'oxyde de bonne qualité, contrairement à une oxydation en atmosphère humide.

La simulation de l'étape d'oxydation thermique a été optimisée pour avoir la couche d'oxyde d'épaisseur voulue (65 nm). La figure II-19 représente le cycle thermique de cette oxydation.

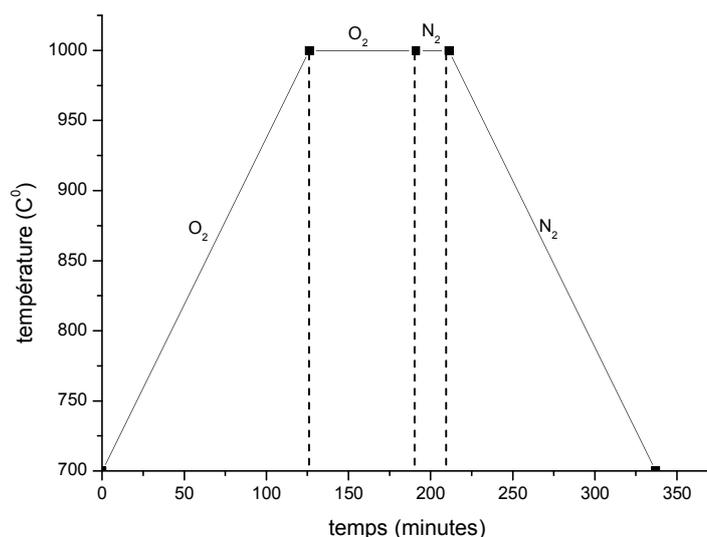


Figure II-19 : Cycle thermique de la formation d'oxyde de grille.

Cette oxydation s'effectue sous une atmosphère en oxygène sec dans le but d'avoir un oxyde de bonne qualité à l'interface SiO_2/Si , en particulier pour minimiser les pièges présents à cet interface.

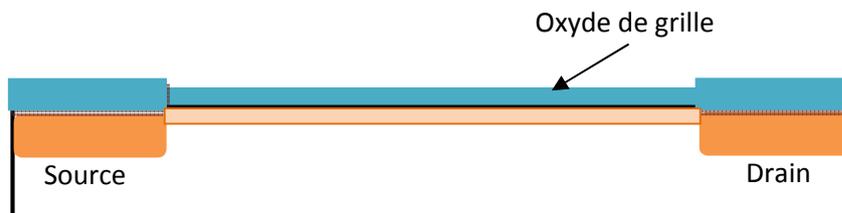


Figure II-20 : Formation d'oxyde de grille.

III-1.8 Phase 6 : dépôt de nitrure de silicium Si_3N_4

Nous avons déposé une couche de nitrure de silicium de 65 nm qui assure une bonne qualité diélectrique. Cette couche est utilisée dans les capteurs chimiques ISFET comme une membrane sensible aux ions d'hydrogène. Le dépôt de Si_3N_4 est obtenu généralement par dépôt chimique en phase vapeur (LPCVD). Cette méthode est modélisée en utilisant le modèle physique de Monté Carlo.

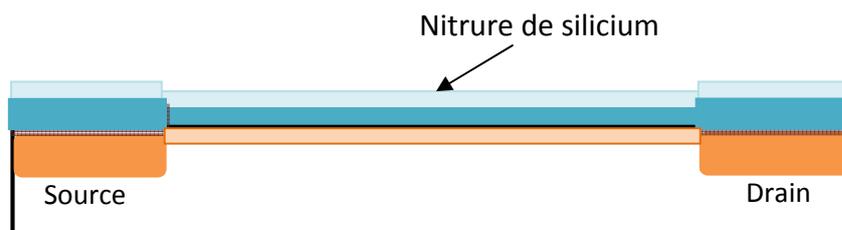


Figure II-21 : Dépôt de nitrure de silicium.

III-1.9 Phase 7 : métallisation

Les contacts métalliques du composant sont réalisés par un dépôt sur la surface avant du composant d'une couche d'aluminium avec une épaisseur de 100 nm. Puis une opération de gravure est nécessaire pour enlever le métal des zones non désirées.

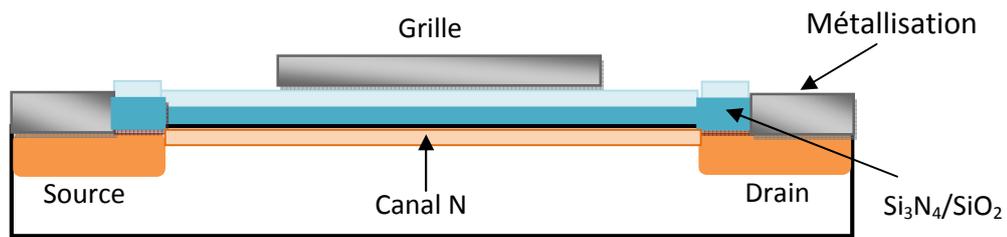


Figure II-22 : formation des contacts métalliques.

IV- Paramètres technologiques et géométriques du composant fini

A la fin de ce chapitre, nous regroupant l'ensemble des paramètres du MOSFET canal N suite à la simulation par ATHENA et nous donnons la figure du dispositif fini (figure III-23). Concernant les dimensions, il s'agit des caissons implantés, de la longueur du canal et de la longueur de la grille métallique, ainsi que les profondeurs des jonctions source et drain. Les dimensions du MOSFET seront définies.

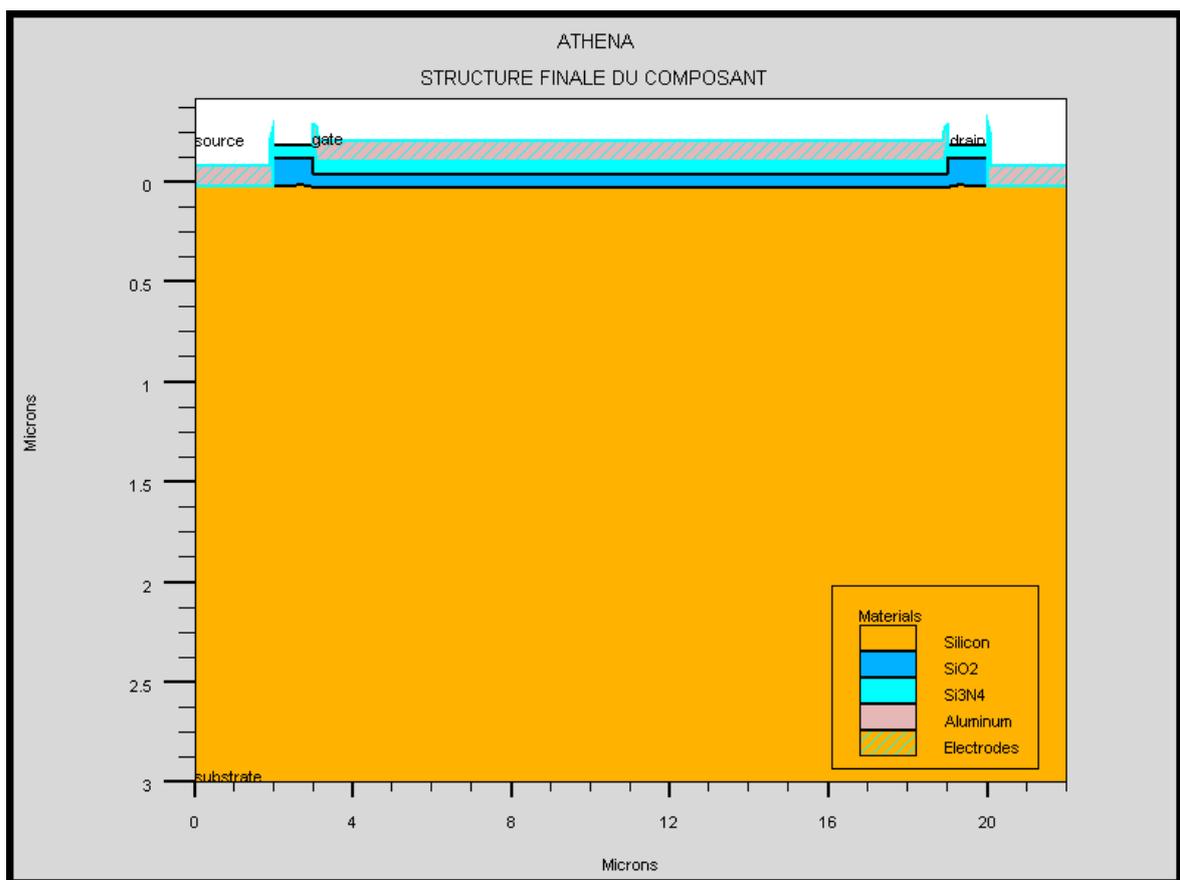


Figure III-23 : Structure finale du composant simulée sous ATHENA.

En ce qui concerne les paramètres technologiques, nous allons présenter une synthèse des caractéristiques du dispositif fini dans le tableau ci-dessous : le type et le dopage du substrat, le dopage des caissons source et drain, l'épaisseur des isolants, à savoir l'oxyde de grille et le nitrure de silicium, la longueur du canal, et enfin l'épaisseur de la couche de métal (Aluminium) servant d'électrode de grille.

	Substrat	Source	Drain	Canal	SiO ₂	Si ₃ N ₄	Métallisation (Al)
Géométrie (x.y) μm ²	22.3	/	/	/	/	/	/
Épaisseur (nm)	/	/	/	/	65	65	100
Longueur (μm)	16	3	3	16	/	/	/
Profondeur (μm)	3	1.5	1.5	/	/	/	/
Type	P	N ⁺	N ⁺	N	/	/	/
Dose (As) (cm ⁻²)	/	5.4 10 ¹⁴	5.4 10 ¹⁴	/	/	/	/
Dopage (cm ⁻³)	10 ¹⁵	9.6 10 ¹⁸	9.6 10 ¹⁸	10 ¹⁵	/	/	/

Tableau II-2 : Gradeurs optimales de la structure ISFET.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement, les performances, les modules de simulation ATHENA et ATLAS, l'environnement où est défini le programme de simulation (DECKBUILD), et l'outil de visualisation (TONYPLOT) du logiciel TCAD-SILVACO. Puis nous avons décrit les étapes de simulation du procédé technologique réalisé par le logiciel ATHENA, en présentant pour chaque étape technologique le modèle physique utilisé pour cette simulation. L'étude des profils de distribution des porteurs nous a permis de définir la concentration des ions d'arsenic et les profondeurs de jonctions des zones actives. Nous terminons ce chapitre en

regroupant dans le tableau II-2 les principaux paramètres technologiques du dispositif MOSFET simulé par ATHENA.

Nous allons par la suite, dans le chapitre III, optimiser les paramètres technologiques, en tenant compte du cahier des charges préalablement établi pour la formation du canal tels que la dose d'implantation, la profondeur de jonction, et la concentration en surface des ions d'arsenic pour fixer la tension de seuil.

Chapitre III

*Résultats de la simulation électrique du
capteur ISFET*

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude de la simulation électrique de la structure de l'ISFET (ou de son transducteur électrique le NMOSFET) obtenue par ATHENA et présenté au chapitre II précédent. Cette étude du comportement électrique se fera au moyen de l'outil ATLAS-TCAD qui permet d'extrapoler le comportement électrique du composant électronique en se basant sur des modèles spécifiques pour chaque phénomène physiques tel que la génération-recombinaison, etc. Cette simulation permet d'optimiser et améliorer les performances du capteur chimique.

Dans le chapitre II précédent, nous avons étudié l'ensemble des processus technologiques conduisant à l'élaboration du dispositif fini, mais concernant le canal nous nous sommes limités à présenter seulement la méthode de dopage du canal à l'arsenic par pré-implantation à travers une couche d'oxyde. Comme le canal du MOSFET est la partie la plus sensible qui va influencer le plus sur la réponse du futur capteur, nous allons dans un premier temps accorder une attention particulière à l'étude de cette région. Il s'agit donc de donner avec précision, les paramètres d'élaboration du canal, qui sont ajustés au moyen d'ATHENA et ATLAS : ces paramètres concernent des grandeurs importantes telles que la dose, et l'énergie d'implantation, et l'épaisseur de l'oxyde de pré-implantation, et cela dans le but d'ajuster la tension de seuil selon le cahier des charges préalablement établi.

Dans un deuxième temps, nous présenterons le réseau des caractéristiques électriques du composant électronique simulé sous ATLAS. Puis nous étudierons les effets particuliers mis en jeu dans le canal sous polarisation. Enfin nous étudierons les effets de la température sur les performances du dispositif.

I-Optimisation des paramètres technologiques du canal du dispositif MOSFET

Pour vérifier et valider les paramètres technologiques du canal (la dose d'implantation, l'énergie d'implantation et l'épaisseur d'oxyde de pré-implantation du capteur ISFET à canal préformé), et cela dans le but d'avoir une tension $V_T = -1V$ selon le cahier des charges établi au chapitre II, nous avons utilisé plusieurs simulations technologiques et électriques. Les simulations ont été effectuées pour optimiser la région du canal, afin d'obtenir la concentration maximale d'arsenic en surface et la plus faible profondeur de jonction possible (de l'ordre de $0,16 \mu m$). La première étape de simulation

effectuée a été principalement de vérifier les calculs théoriques en utilisant une dose d'implantation de $2,2 \cdot 10^{11}$ at/cm² calculée dans le chapitre II avec une énergie d'implantation de 50 KeV, et une épaisseur d'oxyde de pré-implantation de 45 nm. Selon le calcul, la valeur obtenue de la tension de seuil est de l'ordre de -0,27V. C'est une valeur assez faible par rapport à la tension prévue (-1V). Dans ces conditions, nous avons fait varier l'ensemble des paramètres technologiques pour obtenir la tension de seuil optimale.

La figure III-1 montre la dépendance de la tension de seuil avec la dose d'implantation pour différentes épaisseurs d'oxyde de pré-implantation. La tension de seuil décroît avec la dose d'implantation, et avec l'épaisseur d'oxyde.

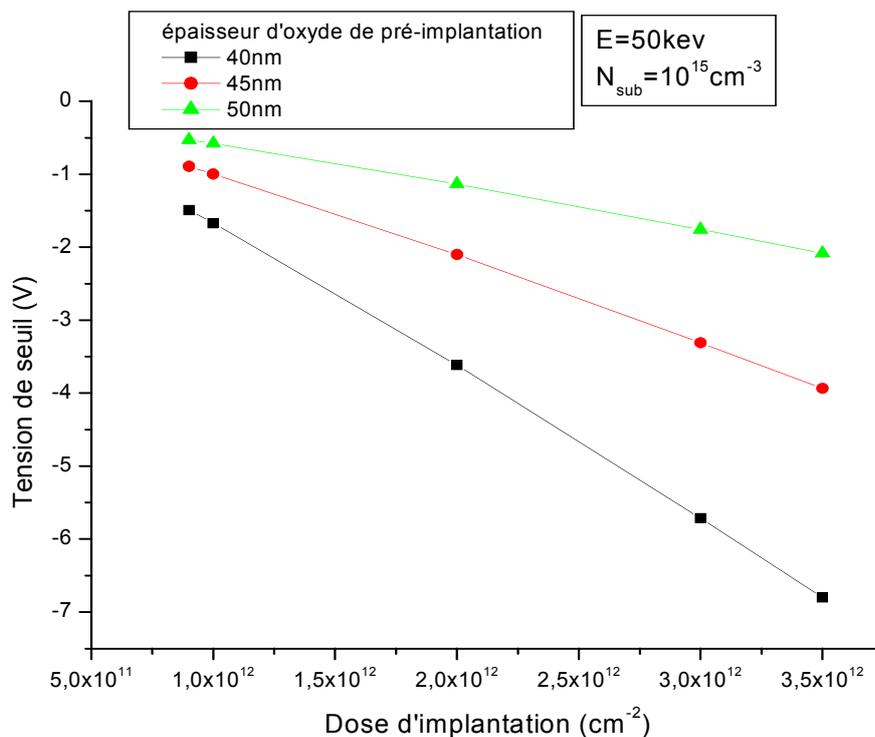


Figure III-1 : Tension de seuil en fonction de la dose d'implantation pour différentes épaisseurs d'oxyde de pré-implantation.

En effet, sur cette figure, on peut constater que la tension de seuil est plus importante pour des oxydes plus épais (50 nm) et elle évolue vers les tensions négatives lorsque la dose d'implantation augmente. Ces valeurs varient entre -0,52 V pour 50 nm de SiO₂ et -6,83 V pour 40 nm de SiO₂.

La figure III-2 qui illustre les variations du courant de drain en fonction de la polarisation de grille, confirme que la tension de seuil se décale vers les valeurs négatives lorsque la dose d'implantation du canal augmente conformément à la théorie exposée au chapitre II. Notons que les valeurs de la tension de seuil V_T se déduisent du tracé $I_D(V_G)$ en extrapolant la tangente de la partie linéaire de la courbe sur l'axe V_G . Notons aussi que l'épaisseur d'oxyde de pré-implantation choisi pour cette simulation est de 45 nm.

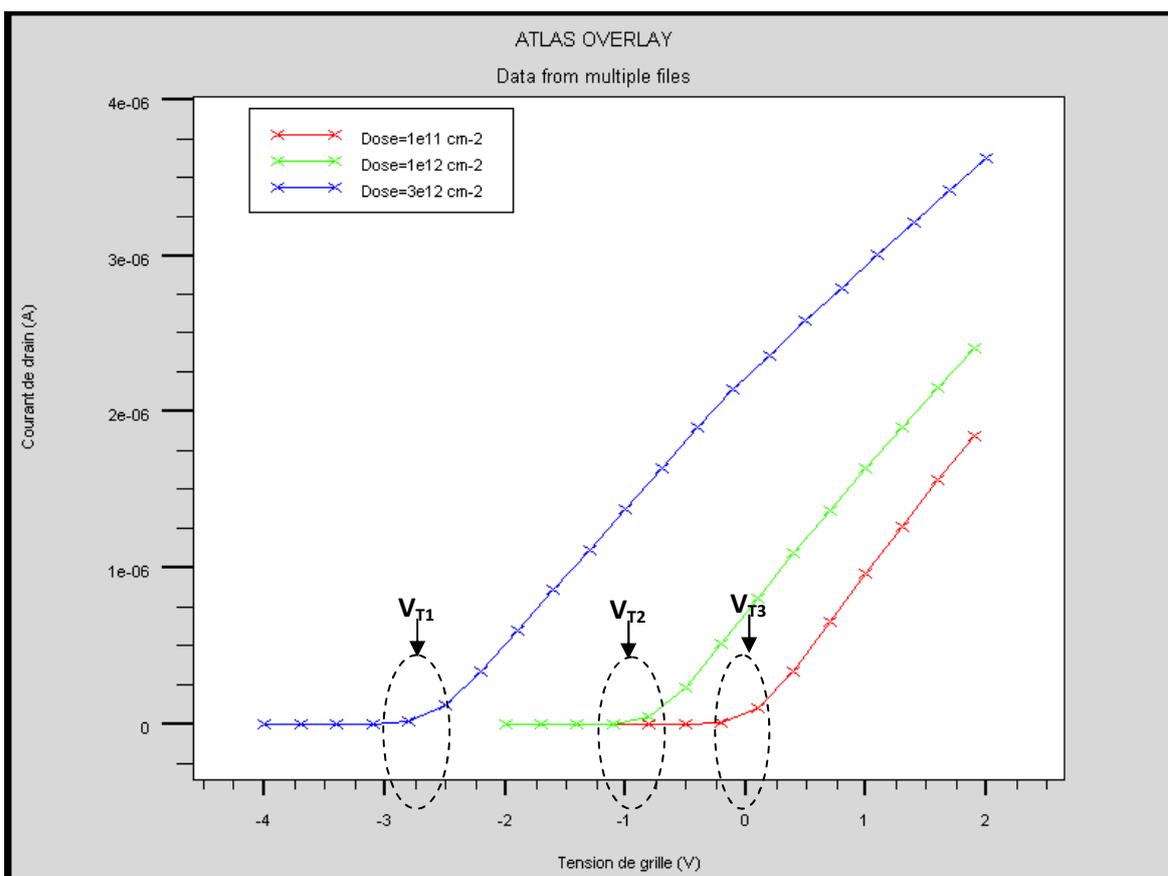


Figure III-2 : Simulation sous ATLAS du courant de drain en fonction de la tension de grille pour différentes doses d'implantation du canal préformé.

Lorsque l'impureté chargée pénètre dans le substrat, elle perd son énergie par interaction avec les électrons et par collision avec les atomes, ce qui détermine la profondeur de jonction dans le substrat [31]. On peut montrer aussi, que la profondeur de jonction est liée à la dose d'impuretés implantées dans le canal (figure III-3). Les profondeurs de jonction du canal sont comprises entre environ 0.14 et 0.25 μm (selon les

épaisseurs d'oxyde de pré-implantation considérées), ce qui représente des jonctions très courtes.

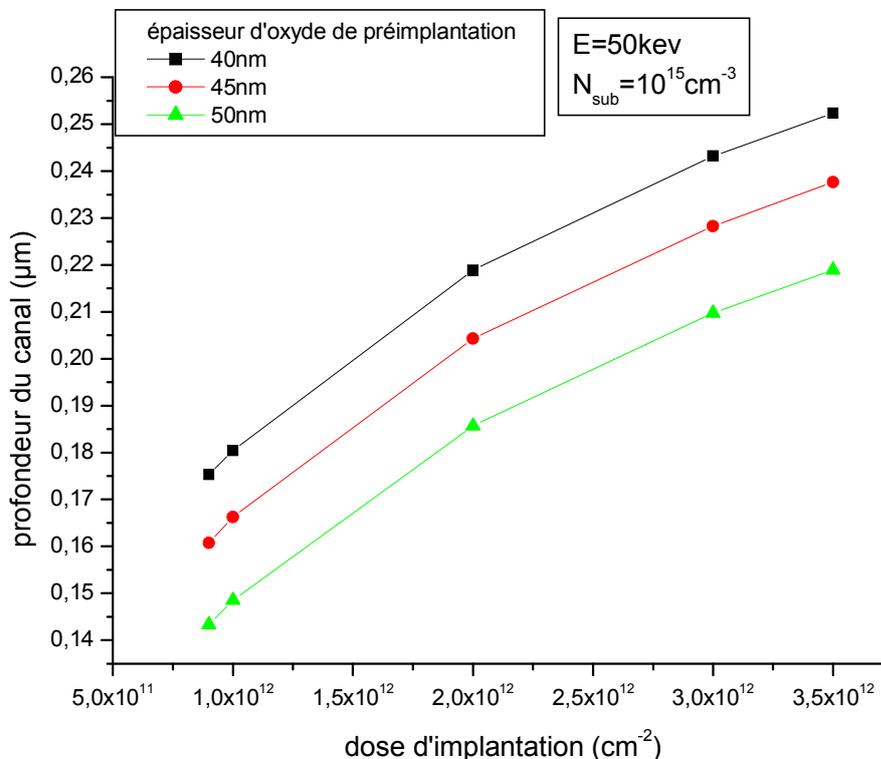


Figure III-3 : Profondeur du canal en fonction de la dose d'implantation pour différentes épaisseurs d'oxyde de pré-implantation.

Sur cette figure III-3, on fait varier comme paramètre, l'épaisseur de la couche d'oxyde de pré-implantation, pour des valeurs de 40, 45, 50 nm. On remarque que la profondeur du canal augmente lorsque l'épaisseur de l'oxyde diminue, ce qui est conforme au rôle de SiO_2 qui agit comme masque lors de la phase d'implantation.

La figure III-4 représente la concentration des ions d'arsenic dans le canal en fonction de la profondeur du canal pour différentes doses d'implantation. On peut constater que, pour atteindre une faible profondeur de jonction, il faut prendre une dose d'implantation assez faible. Notons que l'épaisseur de l'oxyde de pré-implantation reste toujours fixée à 45 nm.

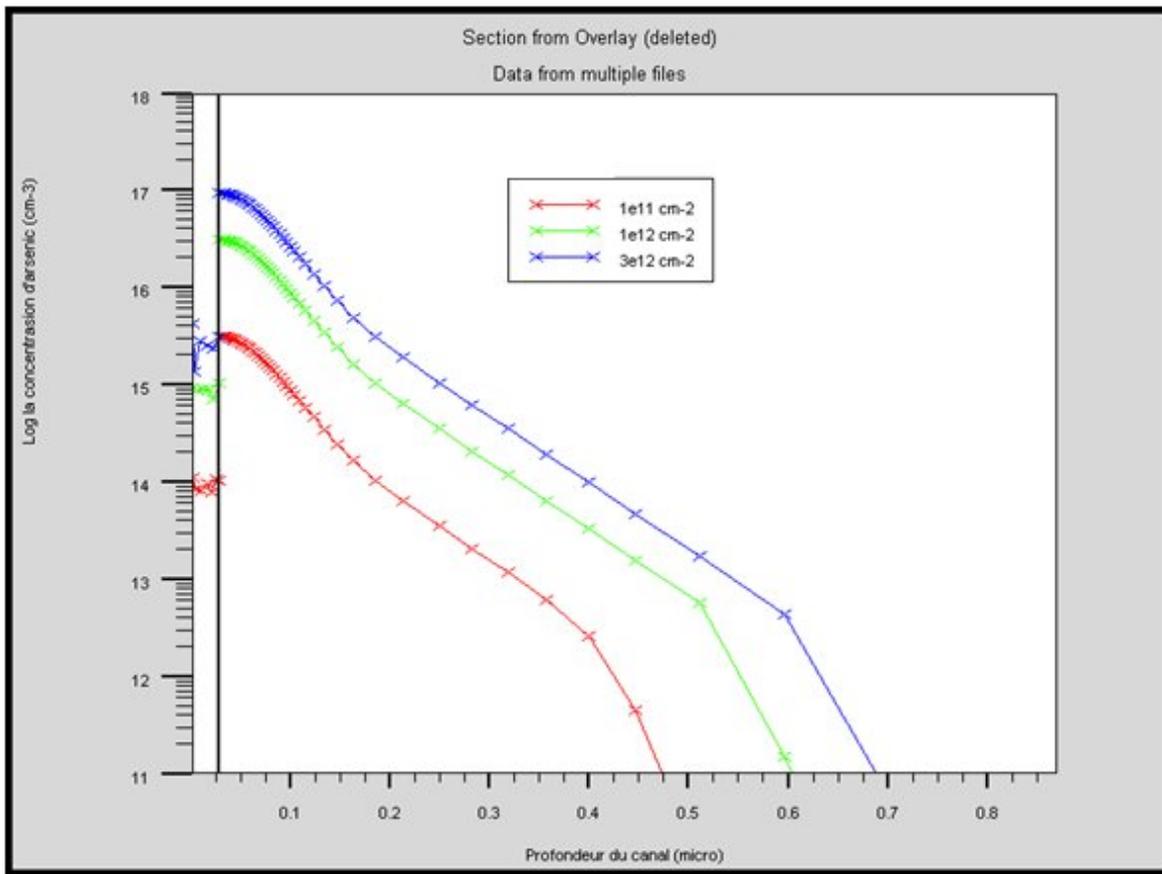


Figure III-4 : Profondeur des ions d’arsenic dans le canal simulé sous ATHENA implanté à 50 KeV avec 45 nm de SiO₂.

La figure III-4 indique aussi les valeurs de la concentration d’arsenic (en atomes/cm³) répartie sur la profondeur du canal, et maximale à la surface du canal. On remarque que le niveau de dopage d’Arsenic est très élevé en surface dans ce canal.

En ce qui concerne l’influence de la couche d’oxyde de pré-implantation, la figure III-5 suivante montre, que pour avoir une forte concentration d’arsenic en surface avec une faible dose d’implantation, il faut que cette couche d’oxyde soit assez mince, d’épaisseur de l’ordre de 40 à 50 nm.

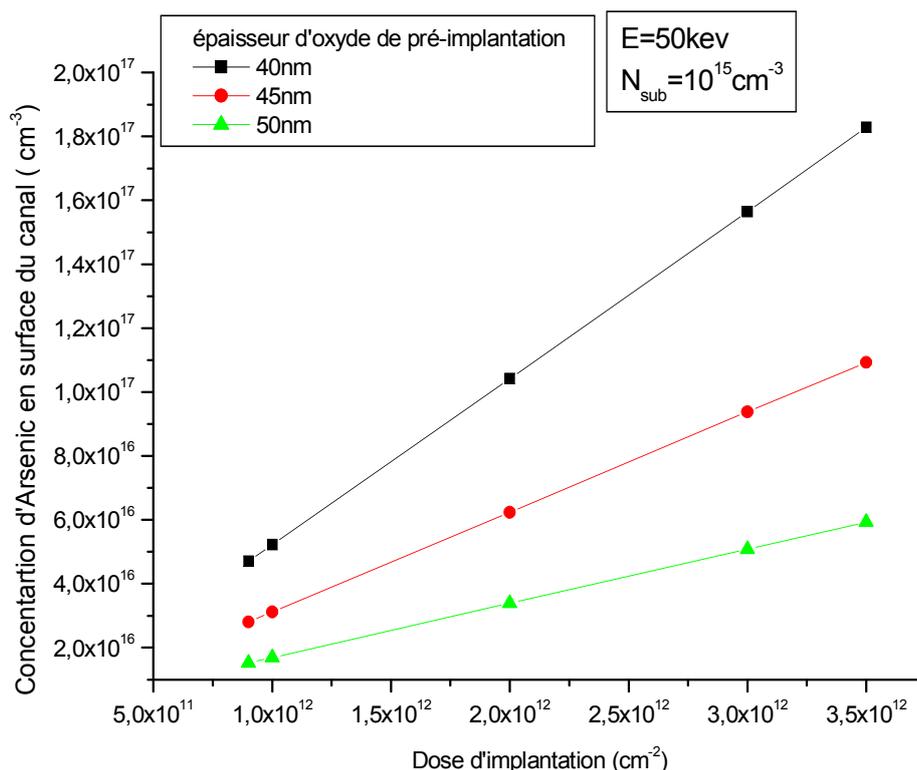


Figure III-5 : Concentration d'arsenic à la surface du canal en fonction de la dose d'implantation pour différentes couches d'oxyde de pré-implantation.

Après une analyse des résultats de nos simulations, et en tenant compte du cahier des charges établi auparavant au chapitre II, nous avons choisi une dose d'implantation de 10^{12} cm^{-2} (ce qui correspond à la concentration d'arsenic de $3,12 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et une profondeur de $0,165 \text{ }\mu\text{m}$) avec une énergie d'implantation de 50 KeV à travers une couche d'oxyde de pré-implantation de 45 nm . Ces valeurs correspondent à une tension de seuil de -1 V , comme on peut le confirmer d'après les résultats de figure III-1.

Avec ces paramètres optimaux, nous traçons sur la figure III-6 ci-dessous, le profil de distribution des atomes dopants d'Arsenic sur toute l'épaisseur du substrat. Cette figure permet aussi de remarquer l'uniformité du dopage du substrat avec des atomes de bore à la concentration de 10^{15} cm^{-3} .

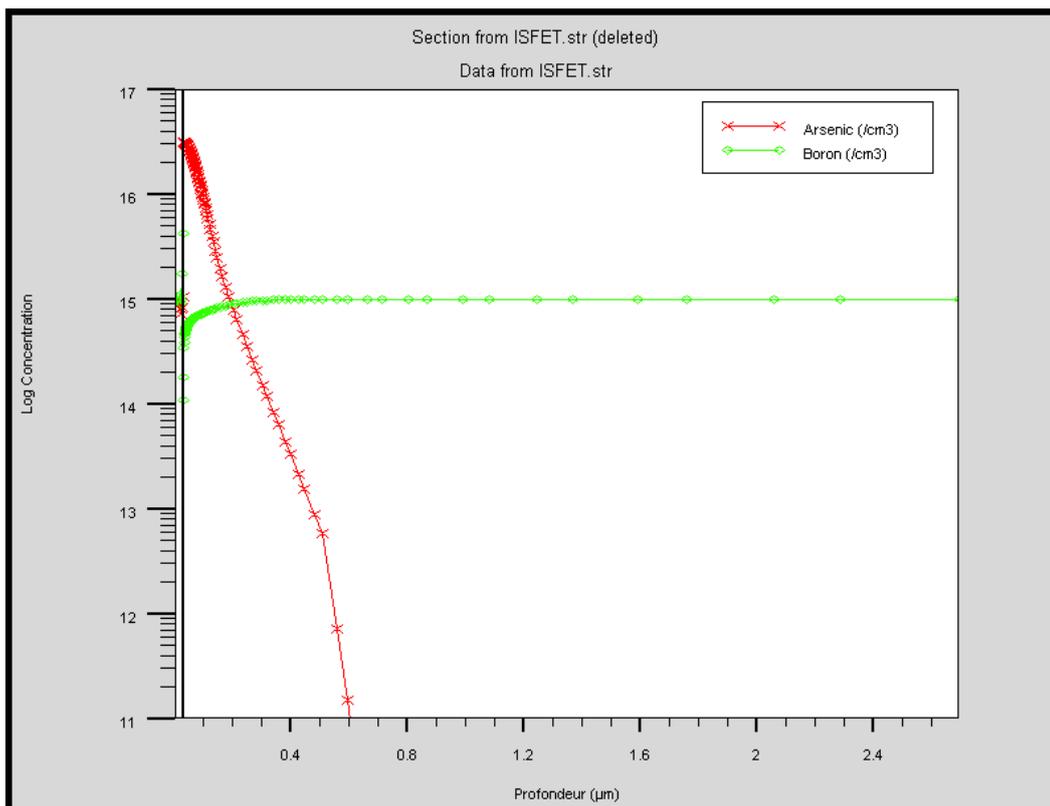


Figure III-6 : Profil de distribution d'impuretés d'arsenic dans le canal dans le substrat de type P avec la dose de 10^{12} cm^{-2} à 50 KeV, et 45 nm d'oxyde de pré-implantation.

Pour finir ce paragraphe, nous représentons sur la figure III-7 suivante une vue en 2D du transistor que nous avons simulé par ATHENA, et qui montre la répartition des différents niveaux de dopage dans les caissons source et drain et dans la région du canal. Comme notre étude au chapitre II l'a préalablement défini, cette figure illustre bien les valeurs élevées des dopages de source et drain (de l'ordre de 10^{18} cm^{-3}), ainsi la valeur du dopage du canal (de l'ordre 10^{16} cm^{-3}). Cette figure montre aussi les profondeurs des caissons ainsi que la profondeur très courte du canal pré-implanté.

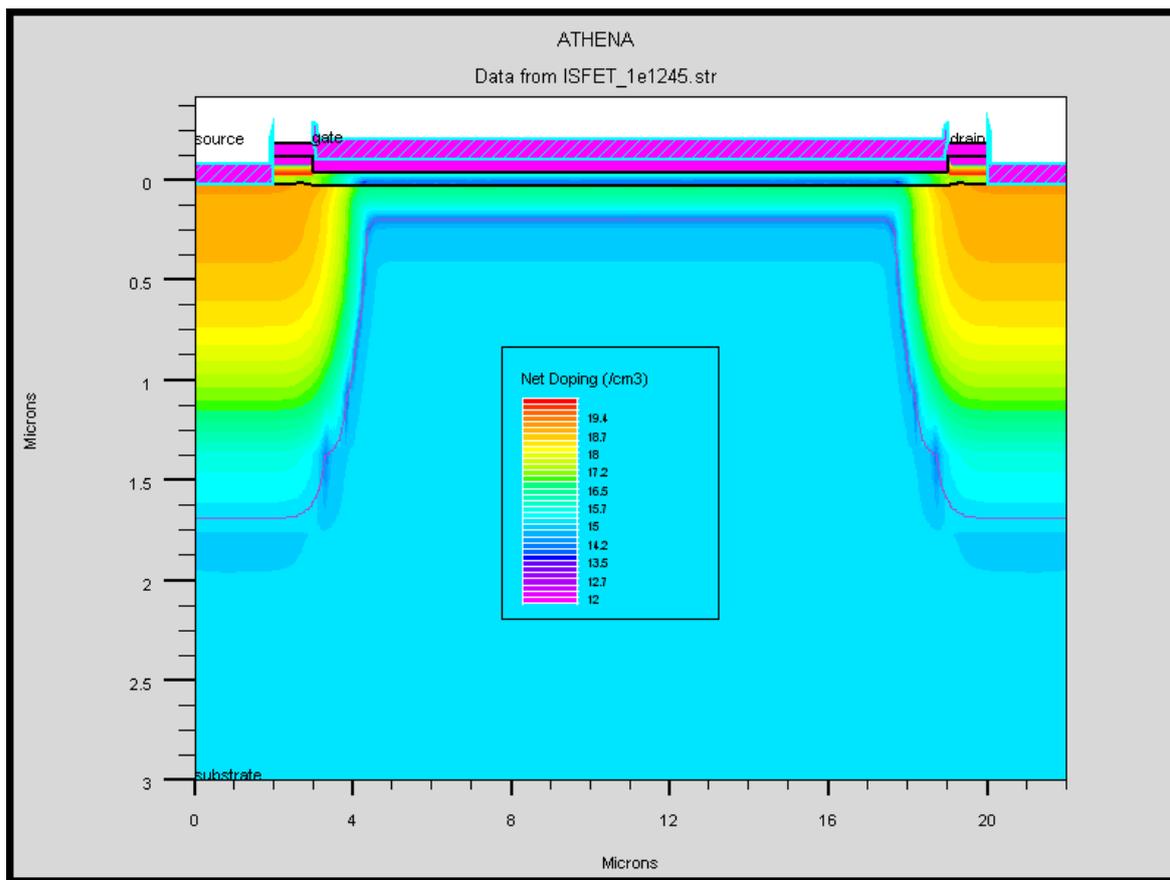


Figure III-7: Coupe en 2D du transistor NMOSFET à canal préformé simulée par ATHENA.

II- Caractérisation électrique du composant

Comme nous l'avons déjà mentionné pour la caractérisation de l'ISFET nous devons commencer par nous assurer de la validité du fonctionnement de la structure de son transducteur électrique, le MOSFET [44]. En effet dans cette étude, la simulation électrique sous ATLAS du capteur chimique ISFET est basée sur la simulation électrique du transistor NMOSFET (transducteur électrique) conçu et optimisé technologiquement sous ATHENA. Dans ce paragraphe, les simulations sont effectuées sur la structure du dispositif finalisé, représentée sur la figure II-23, et dont les paramètres essentiels sont regroupés dans le tableau II-2 du chapitre II.

II-1 Charge d'interface à l'interface isolant ($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$)/Silicium

Dans la structure du MOSFET simulée par ATHENA au chapitre précédent, nous avons choisi comme isolant de grille la bicouche $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ d'épaisseurs toutes égales à 65 nm, et comme grille métallique un dépôt d'Aluminium de 100 nm d'épaisseur.

Rappelons que chacune des couches isolantes a un rôle spécifique. Le nitrure de silicium Si_3N_4 jouera le rôle d'une membrane ionsensible dans le fonctionnement du futur capteur ISFET, alors que le dioxyde de silicium SiO_2 va jouer le rôle de l'oxyde grille de la structure MOS, car il permet d'obtenir une bonne qualité électrique de l'interface isolant/substrat silicium dans la région du canal.

Dans une structure MOS réelle, les charges Q_{ss} présentes dans l'oxyde, appelée aussi charges fixes d'interface, peuvent être mises en évidence par le tracé de la variation de la capacité MIS (Al/isolant/silicium) en fonction de la tension de grille V_G . La figure III-8 qui indique le tracé des variations $C(V)$ en régime dynamique basse fréquence (1 MHz), montre la comparaison entre la structure MIS idéale ($Q_{ss}=0$) et la structure MIS réelle ($Q_{ss}\neq 0$), pour la valeur de $Q_{ss}=5.10^{10} \text{ cm}^{-2}$ choisie d'après des valeurs réalisées sur des ISFET's expérimentaux [6]. Le décalage observé sur les tracés $C(V)$ avec $Q_{ss}\neq 0$, montre que la tension de seuil se déplace vers les valeurs négatives, conformément à la théorie (chapitre I, relation I-1). L'intérêt de cette figure est d'illustrer l'influence des charges d'interface Q_{ss} sur le comportement électrique de la structure MOS.

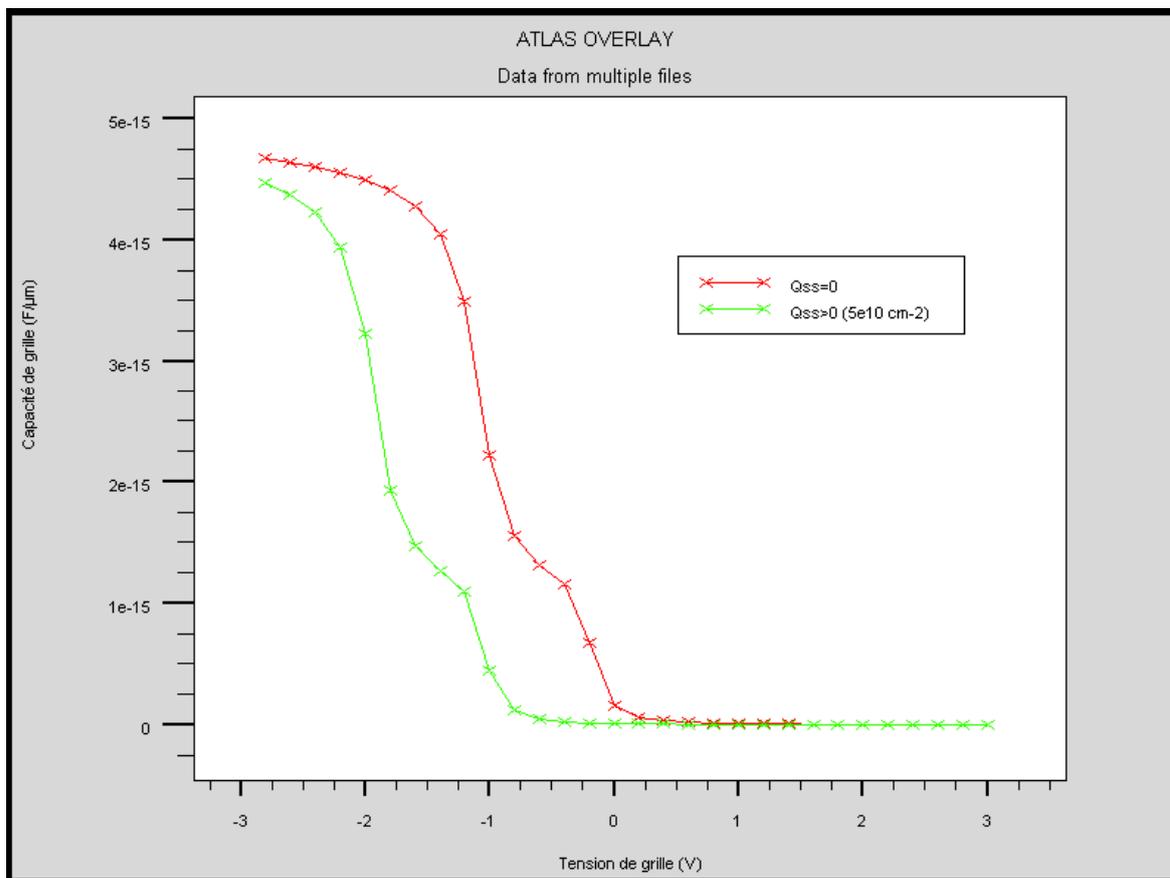


Figure III-8 : Capacité d'une structure MOS simulé sous ATLAS.

II-2 Distribution du potentiel dans la structure

Nous avons simulé par ATLAS, le profil de distribution du potentiel dans la région du canal (figure II-9). La polarisation du composant électronique en régime statique se fait par une tension de grille $V_G=1$ V et une tension de drain $V_D=0.5$ V, alors que source et substrat sont à la masse.

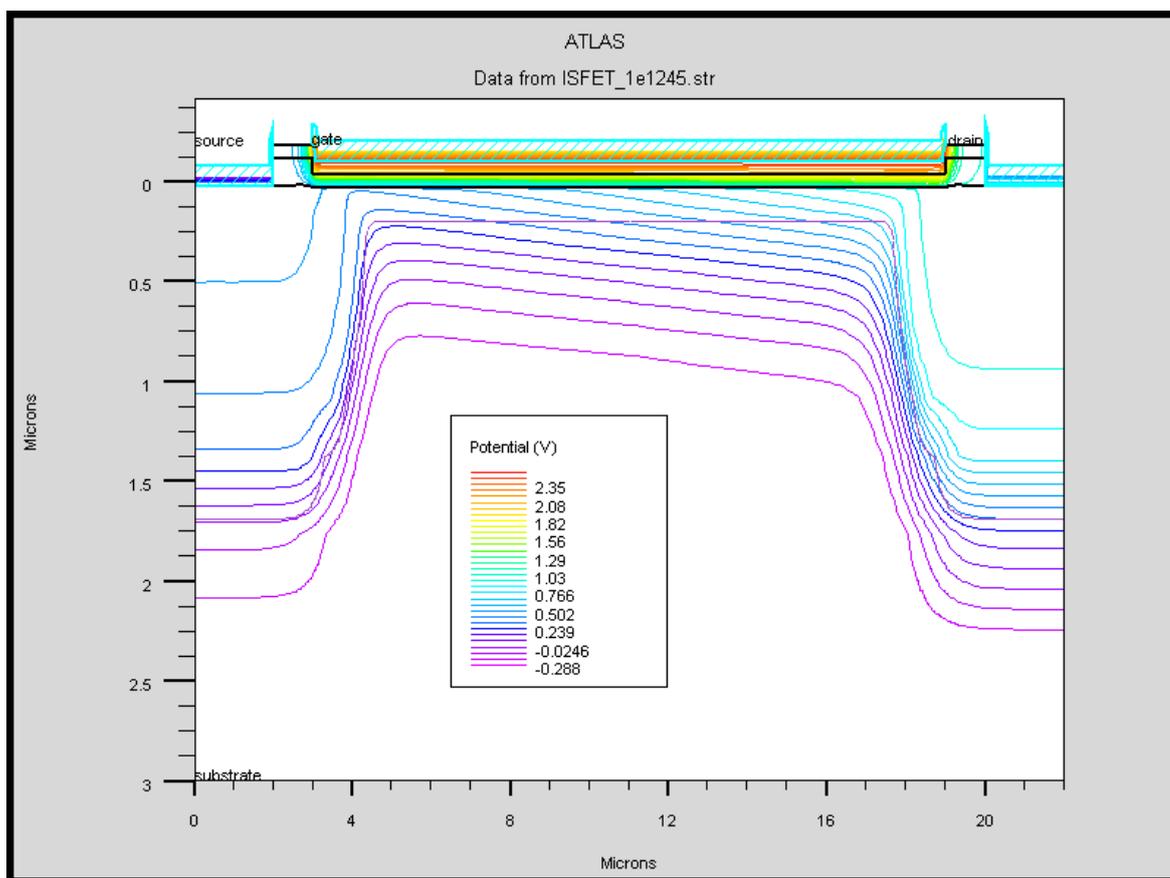


Figure III-9 : Profil de distribution du potentiel dans la structure.

Cette figure montre que les valeurs du potentiel sous polarisation de grille et de drain se répartissent de façon décroissante, en profondeur, de la grille vers le substrat. A l'interface isolant ($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$)/grille métallique (Al), la valeur du potentiel est d'environ 1.03 V, puisqu'elle fluctue légèrement. Puis le potentiel diminue progressivement jusqu'à -0.263V en profondeur. On remarque aussi que l'allure du profil de distribution du potentiel indiquée un gradient de potentiel plus important dans la région proche du drain, ceci étant dû à la polarisation du drain plus élevées que celle de la source, et à la jonction inverse coté drain qui induit des valeurs de tensions inverses élevées au point de pincement.

Nous avons simulé également l'allure du potentiel de surface dans le canal pour différentes valeurs de la tension de grille V_G , allant de -1 V jusqu'à 2 V. La figure III-10 montre l'augmentation du potentiel de surface de la région source vers la région drain, quelle que soit la valeur de V_G . Ces courbes montrent aussi que le potentiel de surface augmente avec la polarisation de grille. Pour chacune des quatre courbes considérées, on peut constater que l'allure est d'abord quasiment linéaire et légèrement croissante, jusqu'à la longueur du canal d'environ 12 μm , puis une forte augmentation du potentiel est observée jusqu'à la longueur de 14 μm , valeur où est supposé apparaître le point de pincement du canal, qui est le lieu d'un champ électrique interne intense et qui explique les fortes valeurs du potentiel. Ce phénomène dans le MOSFET est bien connu dans la littérature en physique des composants à semiconducteur [12].

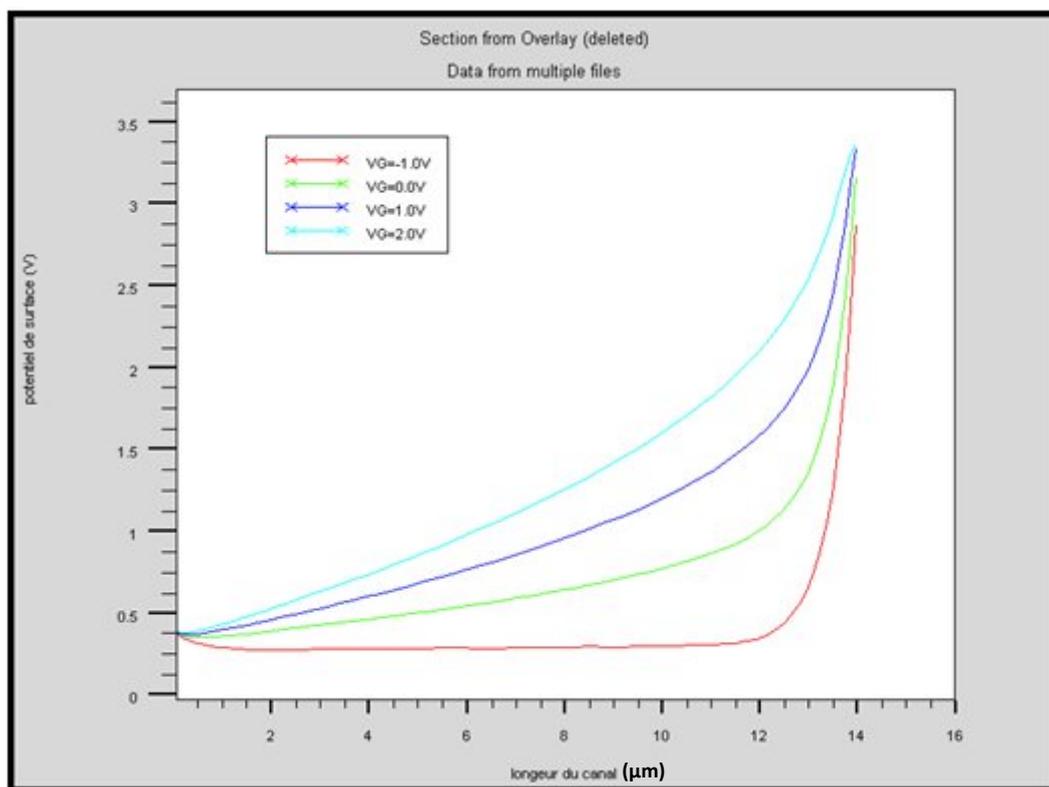


Figure III-10 : Potentiel de surface dans le canal pour différentes valeurs de tension V_G , avec $V_D=0.5\text{ V}$.

II-3 Caractéristiques statiques du composant électronique :

Pour étudier la réponse en courant de notre dispositif MOS sous polarisation de drain et de grille, nous avons simulé d'abord la variation du courant de drain I_D en fonction de V_G pour différentes valeurs de V_D (figure III-11). Puis nous avons tracé le réseau de caractéristiques I_D en fonction de V_D (figure III-12). Nous avons fait ensuite une comparaison entre la réponse en courant $I_D(V_G)$ d'un MOSFET à isolant de grille conventionnel (SiO_2) et celle de notre structure MOSFET à isolant de grille bicouche $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ qui sera utilisée pour le fonctionnement d'un ISFET (figure III-13).

Concernant la figure III-11 ci-dessous, pour des polarisations de grille allant de -2 V à +2 V, notons d'abord que la caractéristique $I_D(V_G)$ simulée par ATLAS est en accord avec celle donnée par la théorie (chapitre I). On peut constater que le courant de drain est maximum lorsque la tension de drain est maximum. Il varie pour des tensions de drain entre 0.5 V et 2 V de 2.5 μA à 6.5 μA . Par extrapolation de ces courbes sur l'axe V_D on peut obtenir les valeurs de la tension de seuil V_T comprises entre -1 V et -0.95V.

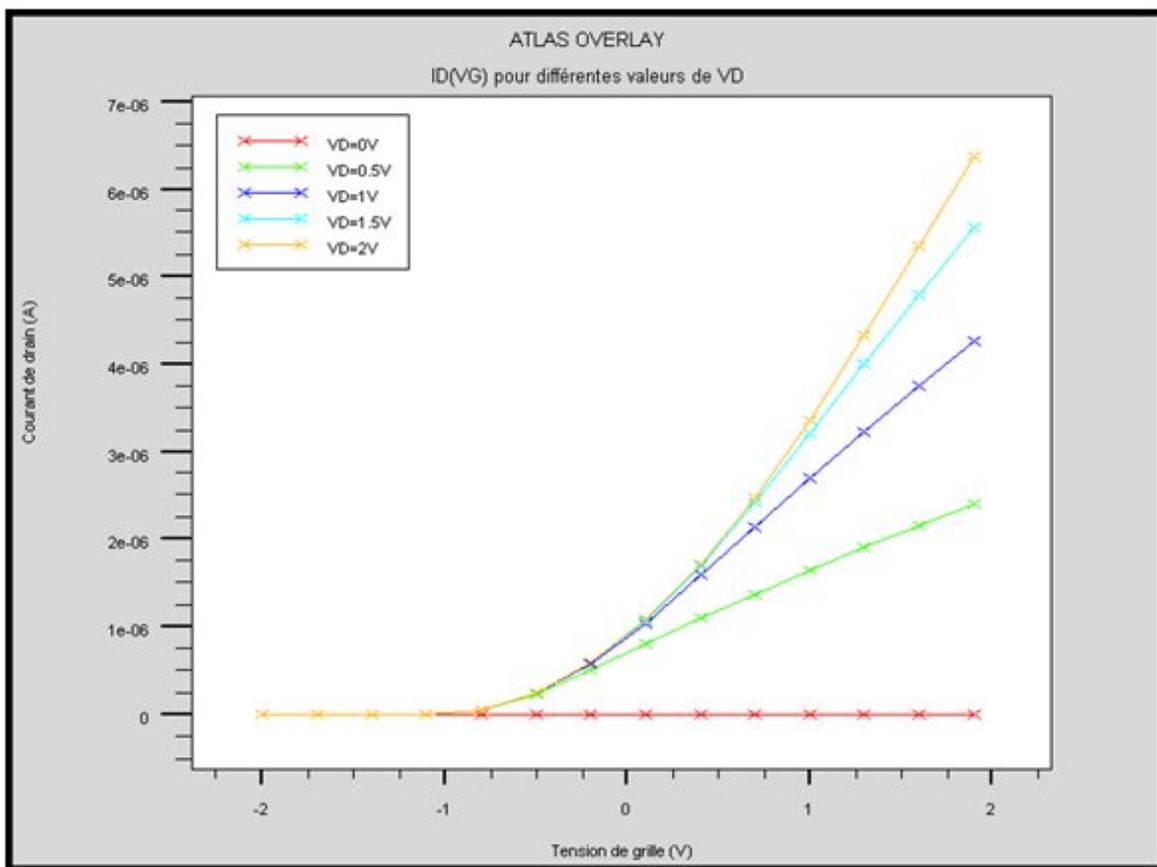


Figure III-11 : Courbe du courant I_D en fonction de la tension V_G simulée par ATLAS.

Nous remarquons sur la figure III-12 ci-dessous, que pour V_G allant de 0 V à 5V, le comportement du courant I_D en fonction de la polarisation du drain V_D obéit à la théorie (chapitre I, figure I-13) qui prévoit deux régions : le premier appelé régime linéaire (qui est compris entre 0 et 2 Volts environ), et le second, appelé régime de saturation qui commence à partir de 2 Volts, et correspond à l'apparition du point de pincement dans le canal. On peut voir aussi que le courant de drain atteint sa valeur maximale lorsque la tension de grille est égale à 5 V. Le courant de fuite estimé par la simulation pour $V_G=0$ V est égal à $I_{off}=9.963 \cdot 10^{-7}$ A.

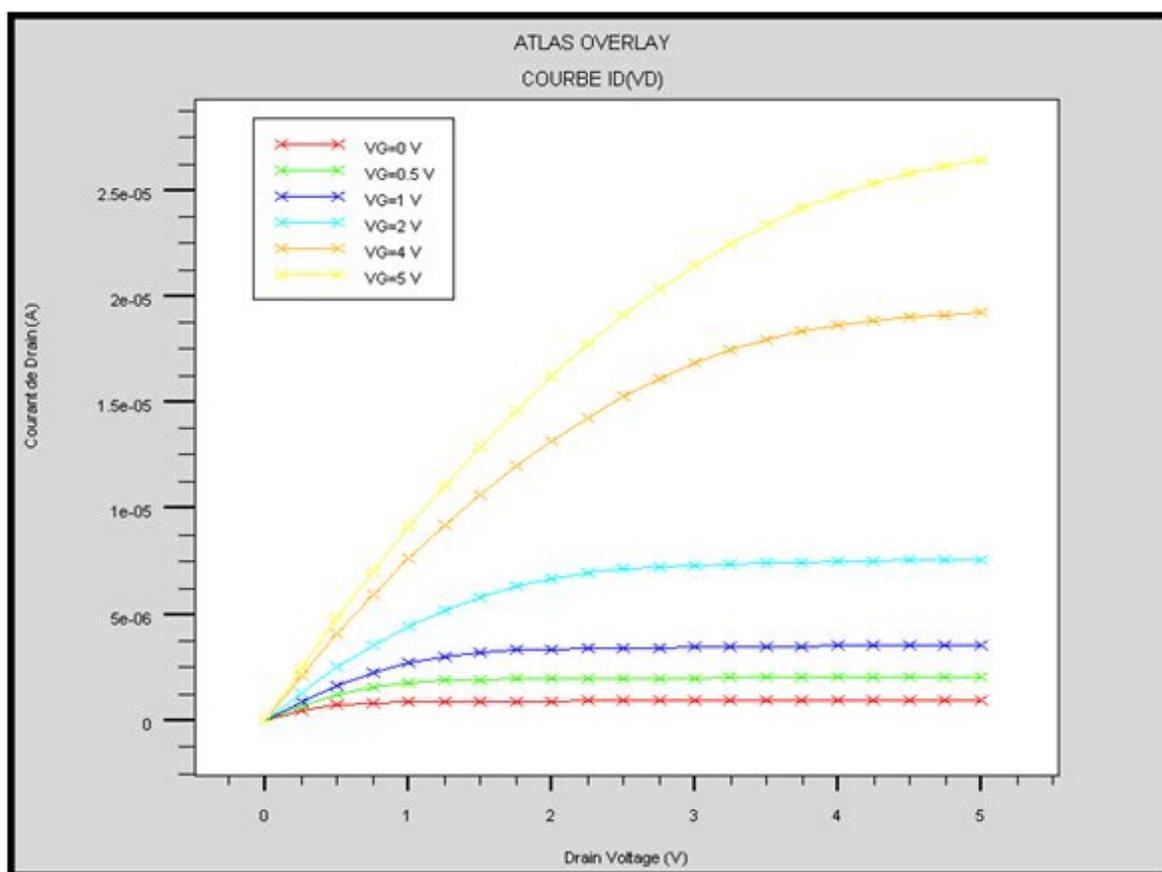


Figure III-12 : Réseau de caractéristique $I_D(V_D)$ simulé par ATLAS.

Enfin, la figure III-13 montre que la réponse en courant du MOSFET avec SiO_2 seul comme isolant de grille, est plus importante que celle de l'ISFET avec l'isolant en bicouche $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$. A titre d'exemple, et comme nous fixons généralement $V_G=1$ V (voir les polarisations fixées dans le paragraphe précédent), pour cette valeur de V_G , nous trouvons $I_D= 2.12 \mu\text{A}$ pour la courbe avec (SiO_2) et $I_D= 1.62 \mu\text{A}$ pour la courbe avec

($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$). Cette différence peut s'expliquer par l'influence de l'épaisseur de l'isolant (épaisseur double dans le cas de la structure bicouche) qui tend à réduire le courant de drain.

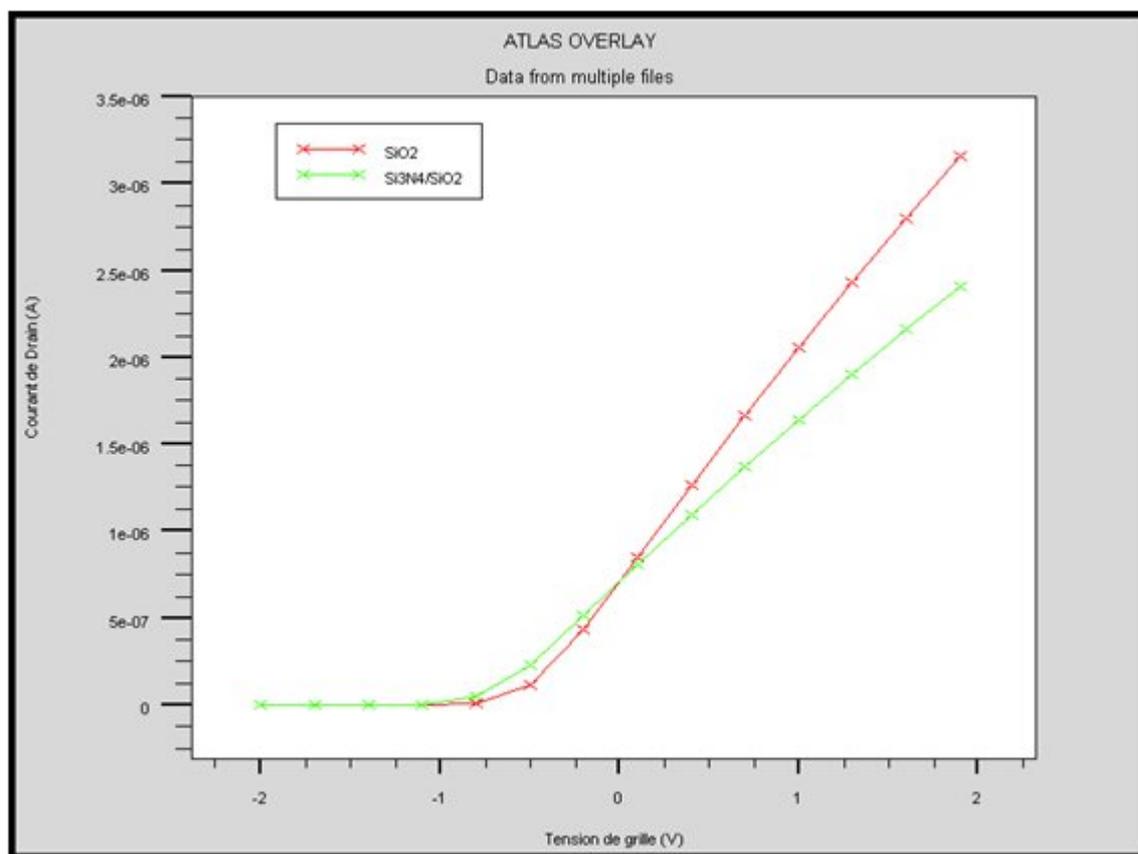


Figure III-13 : Comparaison entre la réponse du MOSFET conventionnel et le transducteur électrique du capteur ISFET.

III- Effet des polarisations de grille et de drain sur l'apparition de phénomènes particuliers dans le canal de L'ISFET

Lorsqu'on soumet notre dispositif aux polarisations de grille et de drain, certains phénomènes particuliers peuvent se produire dans le canal [9, 10, 45], qui se manifestent sous trois formes : la dégradation de la mobilité des porteurs, la saturation de la vitesse des porteurs libres et le phénomène d'ionisation par impact. Ces phénomènes influent sur le comportement de l'ISFET et peuvent entraîner une dégradation de ses performances. Il est donc important de les citer et de tenter de les interpréter.

III-1 Phénomène de dégradation de la mobilité

Les porteurs mobiles (les électrons dans MOSFET canal N) se déplacent dans le canal sous l'effet du champ électrique dû à la polarisation de grille V_G et la polarisation de drain V_D .

Dans une structure MOS, la polarisation V_G positive induit un champ électrique transversal (ξ_y) qui crée dans le canal une couche d'inversion (les électrons) bidimensionnelle dans laquelle des effets de confinement et de dispersion mènent à une dépendance de la mobilité des porteurs mobiles avec les conditions de polarisations [45].

Le champ électrique transversal ξ_y dû à la tension de grille (figure III-14) attire les porteurs près de la surface à l'interface Si/SiO₂. L'interaction des électrons avec la surface induit une réduction de leur mobilité. Ce phénomène est connu sous l'appellation de la dégradation de la mobilité des porteurs [45] comme illustré sur la figure III-15 [9]. Où on voit que les porteurs subissent une réduction de mobilité proportionnelle avec l'augmentation du champ électrique.

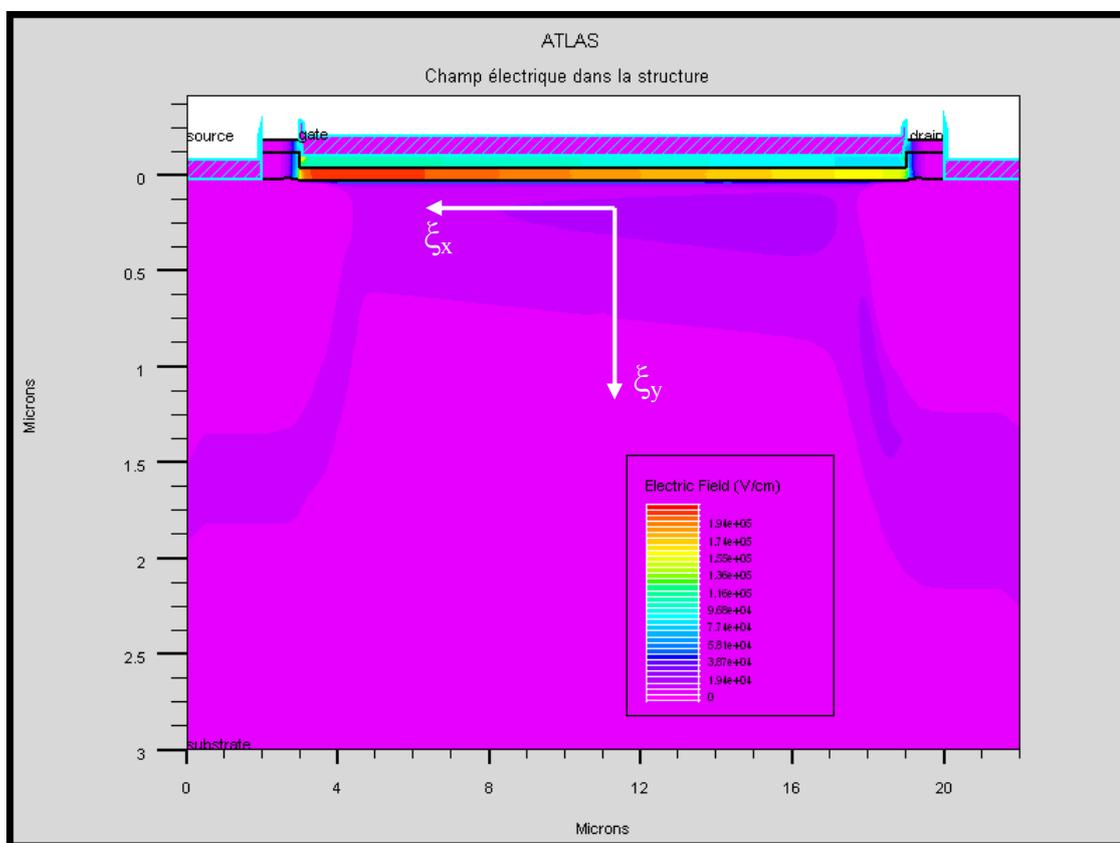


Figure III-14 : Champ électrique dans la structure simulé par ATLAS.

Les porteurs mobiles (électrons) dans le canal peuvent être dispersés par les atomes de dopants ionisés et par la rugosité d'interface Si/SiO₂ [45], et ceci entraîne donc une réduction de leur mobilité, et par conséquent, une dégradation du courant de drain.

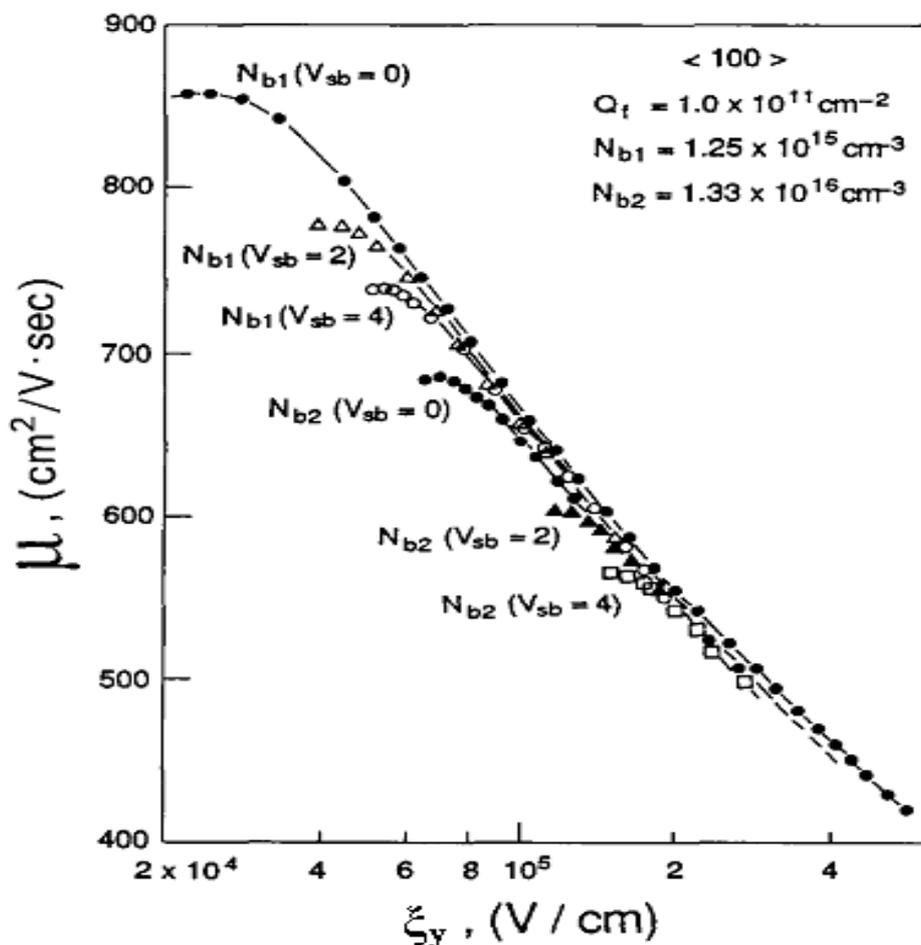


Figure III-15 : Mobilité des électrons dans la couche d'inversion d'un transistor NMOSFET pour différents dopage de substrat [9].

La figure III-16 suivante montre que la mobilité des électrons dans le canal varie dans l'intervalle 700-1170 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, pour notre structure simulée avec un dopage de substrat $N_a=10^{15} \text{ cm}^{-3}$. On remarque sur cette figure que l'allure de la mobilité est en accord avec les résultats de la littérature (figure III-15), et on observe également une décroissance de la mobilité pour des champs électriques intenses. Notons qu'avec les paramètres pris en compte dans nos simulations ($V_G=1 \text{ V}$, épaisseur isolants égale à 135 nm), l'ordre de

grandeur du champ électrique transversal est de 10^4 V/cm, ce qui situerait les valeurs de la mobilité à environ $780 \text{ cm}^2/\text{V.s}$.

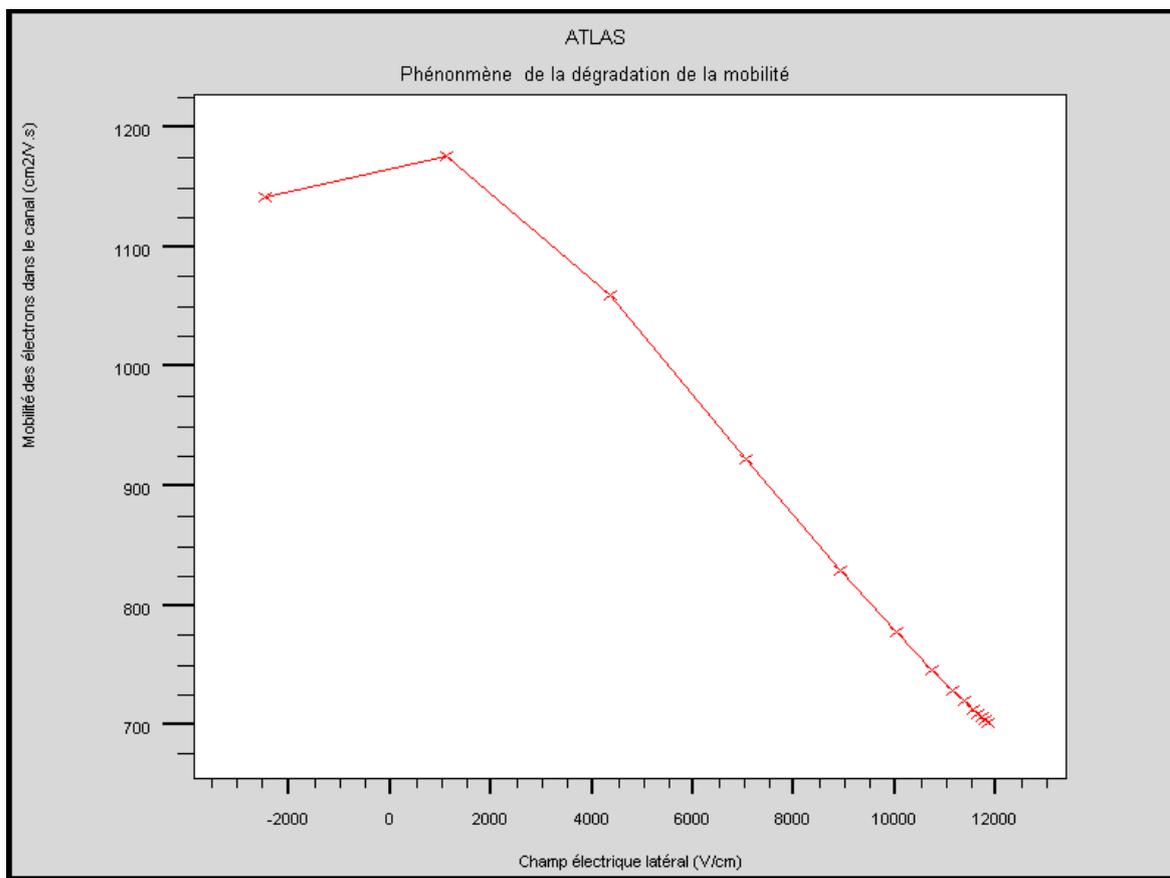


Figure III-16 : Simulation sous ATLAS de la variation de la mobilité des électrons dans la couche d'inversion en fonction du champ électrique transversal ξ_y ($V_D=0.5\text{V}$).

III-2 Phénomène de saturation de la vitesse des porteurs libres dans le canal

Alors que le paragraphe III-1 précédent portait sur l'influence du champ électrique transversal ξ_y sur la mobilité des électrons, il s'agit maintenant d'étudier dans ce paragraphe l'influence du champ électrique latéral ξ_x dans le canal, induit par la polarisation de drain, et représenté sur la figure III-14. Le sens de ξ_x est dirigé vers la source vu que les électrons du canal transitent de la source vers le drain.

Théoriquement, la vitesse des porteurs est proportionnelle au champ électrique appliqué, mais seulement dans le domaine des champs faibles ; pour les champs électriques élevés, la vitesse des électrons atteint une saturation, et dans le silicium, elle est égale à 10^7 cm/s [10]. Ce phénomène se retrouve dans le canal du MOSFET, où la

vitesse des porteurs varie avec le champ électrique latéral. Les valeurs de la vitesse des électrons dans le canal, à l'aide de la simulation par ATLAS-SILVACO, sont données sur la figure III-17. Sur cette figure, la vitesse varie avec la longueur du canal, par conséquent, elle varie aussi avec le champ électrique latéral ξ_x , puisqu'il décroît forcément du drain (polarisé) vers la source (à la masse). Nous constatons que la vitesse croît rapidement, puis elle tend vers une saturation, à la valeur de $9 \cdot 10^6$ cm/s, dans la région drain, où le champ est maximal.

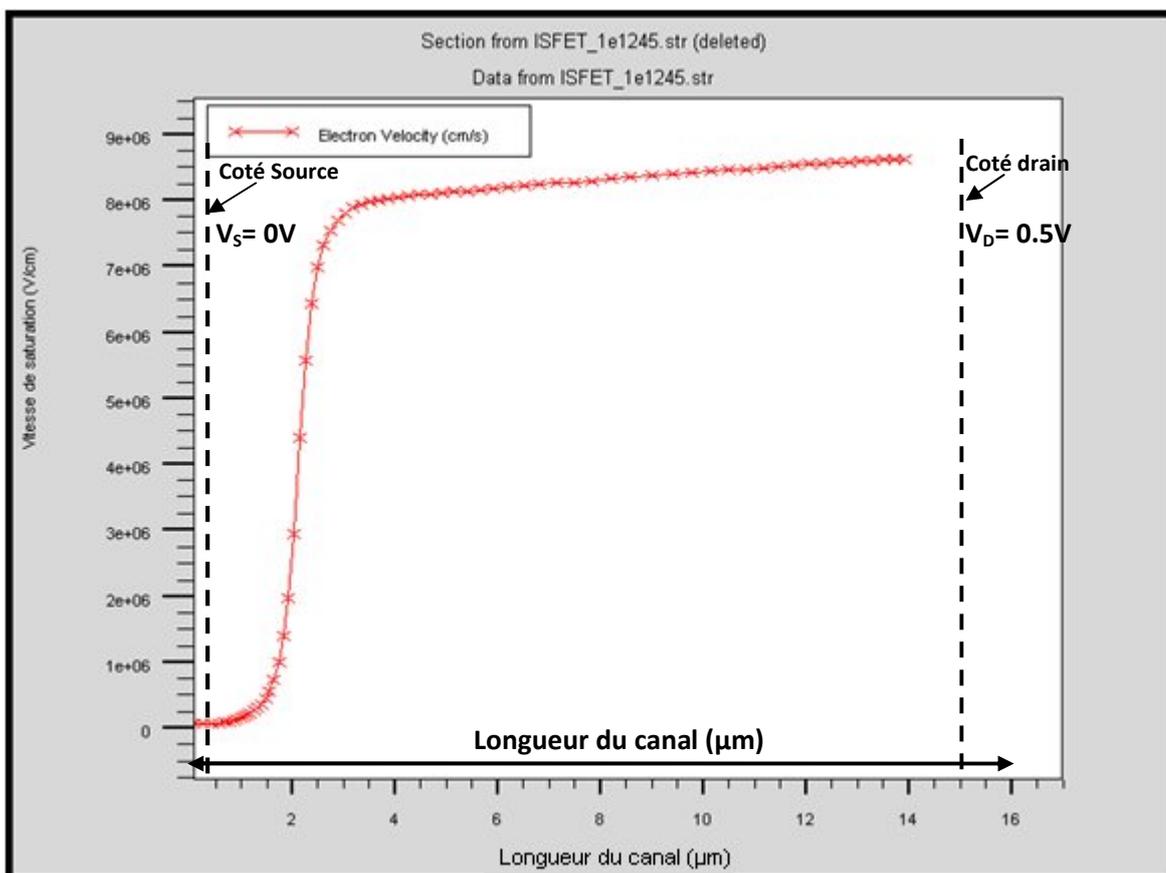


Figure III-17 : Vitesse des électrons dans le canal simulé sous ATLAS-SILVACO

III-3 Phénomène d'ionisation par impact

Lorsque le champ électrique latéral au voisinage de la zone de pincement (coté drain) devient important, il apparaît un phénomène d'ionisation par impact [10,46].

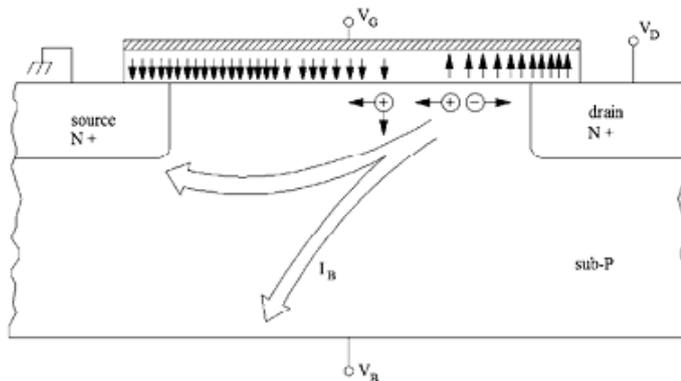


Figure III-18 : Phénomène de création de paires électrons-trous [46].

Sous l’effet du champ électrique latéral (ξ_x) les électrons vont être accélérés de la source vers le drain sous l’effet de la force électrique $-q \xi_x$ (figure III-14). Ces électrons accélérés dans le silicium peuvent stocker une énergie cinétique suffisante et la transmettre au cristal à travers les chocs effectués avec les atomes du réseau cristallin. Ce phénomène peut conduire à la rupture des liaisons de valence et donc la création des paires électrons-trous [45] : c’est le phénomène d’ionisation par impact (figure III-18). Suite à ce phénomène, il se crée un courant dans le substrat (ou Bulk) noté J_B , représenté sur la figure III-19, simulé sous ATLAS.

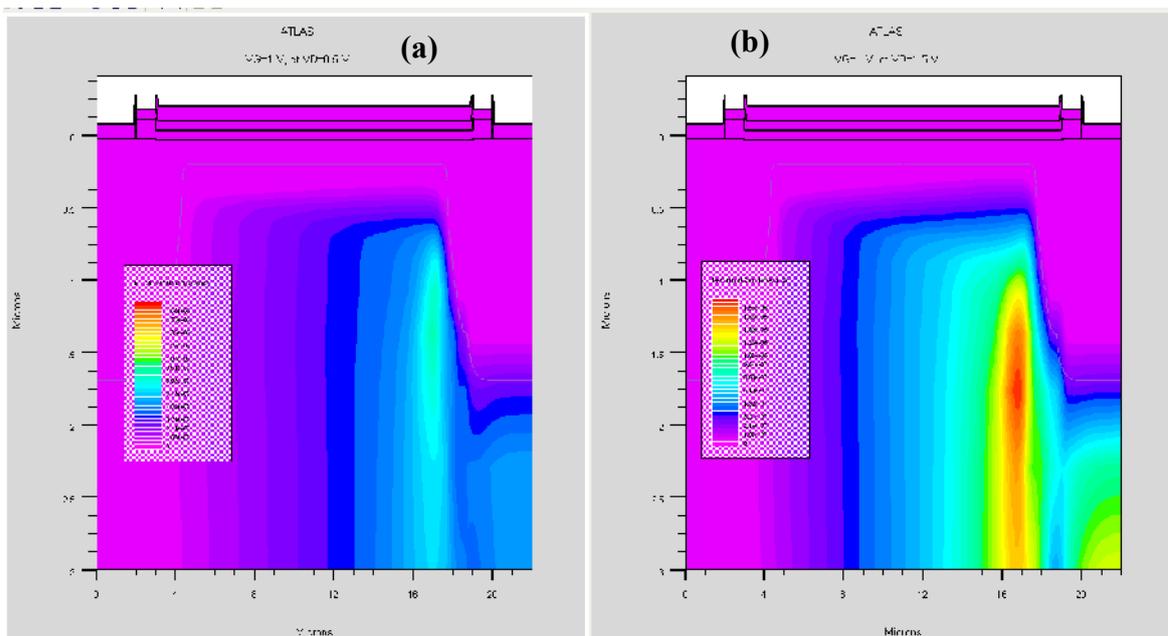


Figure III-19: Densité de courant de trous dans la structure simulé sous ATLAS :
 (a) $V_G=1\text{ V}$ et $V_D=0.5\text{ V}$; (b) $V_G=1\text{ V}$ et $V_D=1.5\text{ V}$.

L'existence du courant de trous J_B , s'explique qualitativement dans ce qui suit : après la création des paires électrons-trous, les électrons vont transiter dans le canal et les trous vont être repoussés dans le substrat et attirés par l'électrode de substrat ce qui donne naissance à une densité de courant de trous dans le substrat (figure III-19), et par conséquent à un courant de substrat. La figure III-19, montre en dégradés de couleurs qui s'intensifie du bleu vers le jaune et rouge, la localisation du courant J_B coté drain, qui est plus intense pour $V_D=1.5$ V (figure III-15 b) que pour $V_D=0.5$ V (figure III-15 a).

Lorsque la longueur du canal diminue, le phénomène d'ionisation par impact prend de l'importance, et le courant de substrat peut poser des problèmes tels que le décalage de la tension de seuil, et la dégradation de la transconductance du dispositif ce qui va perturber l'exactitude des mesures, et par conséquent pourra dégrader la sensibilité du futur capteur ISFET [47].

IV- Effet de la de la température sur le capteur ISFET

Après avoir étudié, dans les trois premiers paragraphes de ce chapitre, le comportement électrique de notre dispositif, nous avons jugé intéressant de considérer les effets de la température, en menant une étude de simulation par ATLAS.

Il est bien connu que le changement de la température du composant affecte ses caractéristiques et par conséquent les performances du circuit. La description précise des effets de la température dans les dispositifs est nécessaire pour prévoir le comportement du circuit sur une gamme de température [47]. Un certain nombre de paramètres importants comme la mobilité, la vitesse de saturation des porteurs libres, et la tension de seuil de dispositif sont liés à la température.

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre I, les capteurs chimiques de type ISFET sont largement utilisés dans le contrôle de l'environnement. Ces composants subissent des variations de température, donc il est indispensable d'étudier l'effet de la température sur le capteur ISFET.

IV-1 Effet de la température sur le courant de drain

Le fonctionnement réel du capteur ISFET ne pouvant pas être simulé par ATLAS, l'étude se fait donc sur le MOSFET.

La figure III-20 montre les variations de la tension de seuil en fonction de la température, obtenus au moyen de tracés $I_D(V_G)$. Notons que lorsque la température diminue de 383 $^{\circ}\text{K}$ (110 $^{\circ}\text{C}$) à 263 $^{\circ}\text{K}$ (-10 $^{\circ}\text{C}$), la tension de seuil augmente de -1.3 à -0.96 avec une augmentation de 0.34V. Comme il est mentionné dans la littérature, la tension de seuil varie linéairement avec la température sur une large gamme de température pour les transistors à canal long [46].

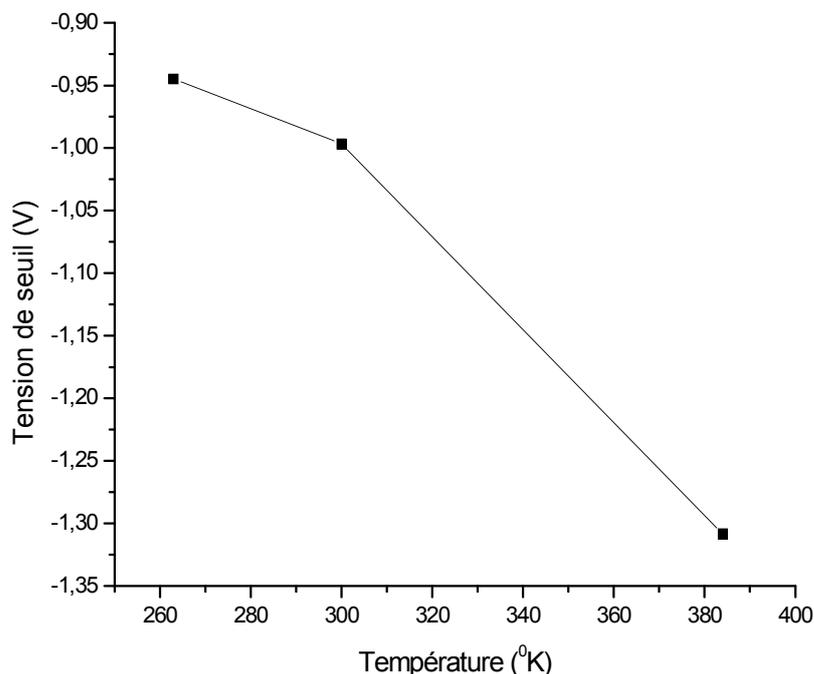


Figure III-20 : Effet de la température sur la tension de seuil du dispositif.

On peut également montrer à partir de la figure III-21 ci-dessous que le courant de drain d'un transistor MOSFET varie considérablement avec la température. Il se dégrade avec une augmentation de température, et ce comportement est observé également dans la littérature [9]. Le changement du courant de drain pour une gamme de température de 263 $^{\circ}\text{K}$ (-10 $^{\circ}\text{C}$) à 383 $^{\circ}\text{K}$ (110 $^{\circ}\text{C}$) est de 48 %, ce qui est une variation considérable.

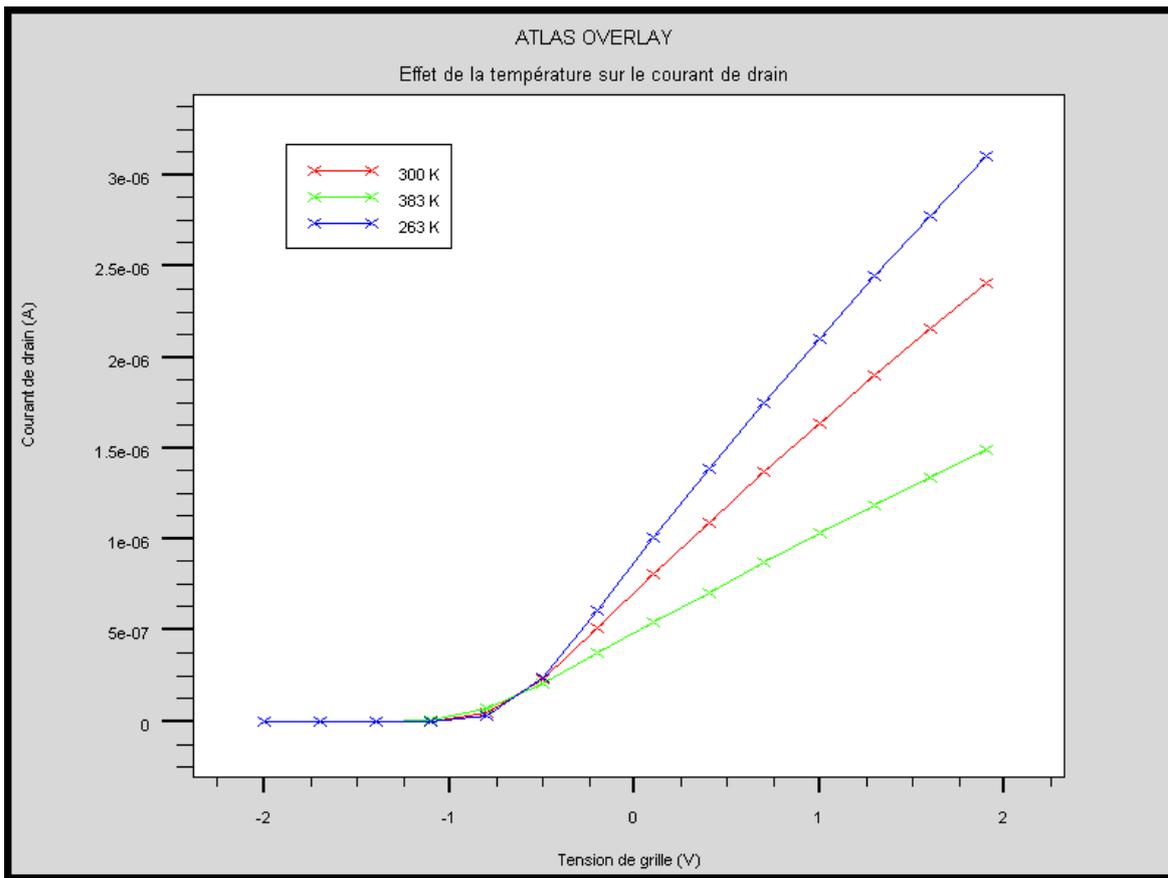


Figure III-21 : Effet de la température sur le courant de drain

IV-2 Effet de la température sur la mobilité des porteurs

La mobilité des porteurs dans la couche d'inversion est fortement liée à la température. Cette dépendance de la température a été employée traditionnellement pour étudier les différents mécanismes de dégradation de mobilité [9].

La figure III-22 illustre l'influence de la température sur la mobilité des électrons de la couche d'inversion dans le canal du MOSFET en fonction du champ électrique transversal. Tout d'abord cette figure montre une dégradation de la mobilité avec le champ, comme nous l'avons constaté au paragraphe III-1.

De plus on constate, sur cette figure, que la mobilité dépend de la température. Elle augmente nettement lorsque la température décroît, phénomène bien connu en physique des semiconducteurs [9], puisqu'une décroissance de température réduit les vibrations du réseau et diminue par conséquent les collisions avec les atomes. Pour donner un ordre de grandeur des valeurs de la mobilité observées sur la figure III-22, les valeurs les plus élevées pour chaque température sont d'environ $1600 \text{ cm}^2/\text{V.s}$, $1200 \text{ cm}^2/\text{V.s}$, et

600 $\text{cm}^2/\text{V.s}$ pour $T= 263 \text{ }^0\text{K}$, 300 ^0K , et 383 ^0K , respectivement. On peut remarquer que pour la valeur du champ électrique de 10^4 V/cm (ordre de grandeur considéré dans notre travail), on trouve une mobilité de 780 $\text{cm}^2/\text{V.s}$ environ à 300 ^0K et 900 $\text{cm}^2/\text{V.s}$ environ pour $T= 263 \text{ }^0\text{K}$.

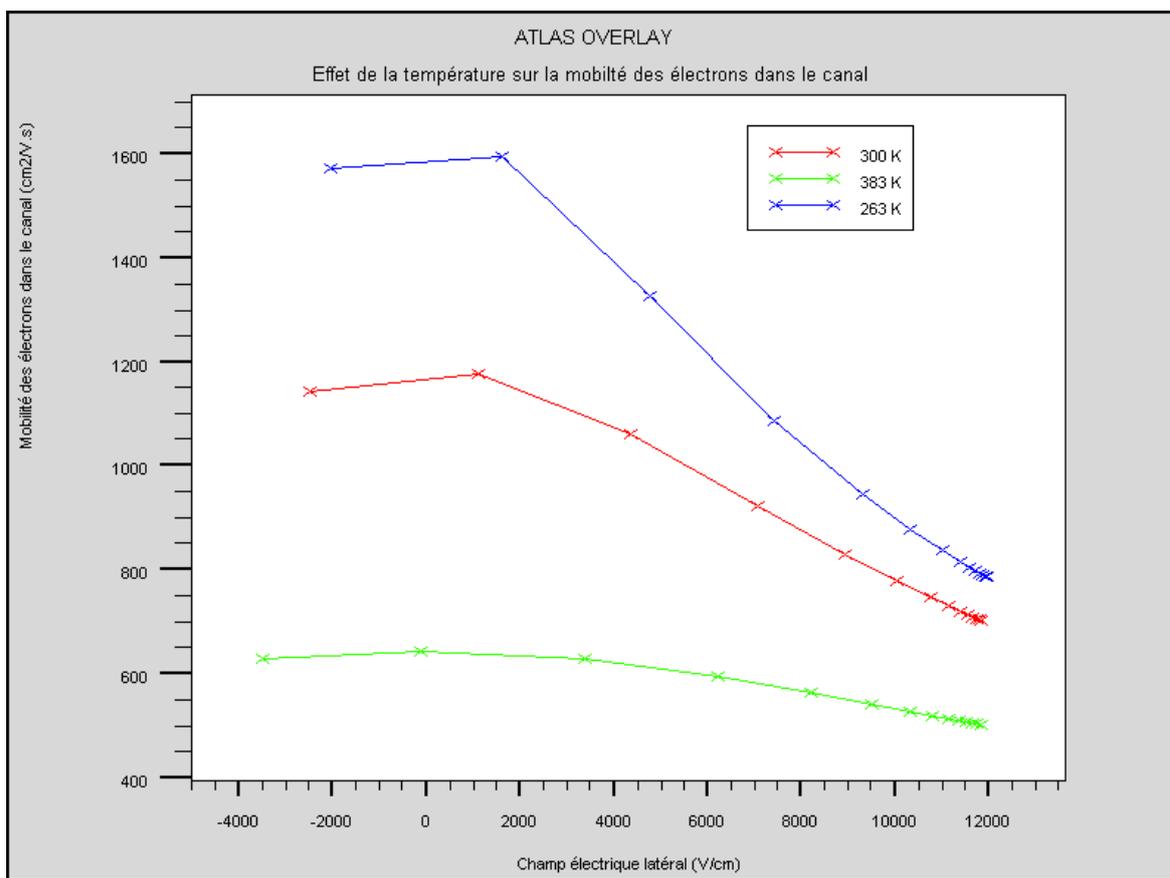


Figure III-22 : Influence de la température sur la mobilité des électrons dans la couche d'inversion.

Enfin, en conclusion sur l'effet de la température sur le comportement électrique du MOSFET, et par conséquent, sur celui du futur ISFET, nous pouvons dire que nous devrions privilégier des mesures à basses températures, pour observer un meilleur fonctionnement électrique du dispositif.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons regroupé l'ensemble des résultats des simulations obtenus par les outils ATHENA, et ATLAS de TCAD-SILVACO.

Dans un premier temps, nous avons optimisé les grandeurs d'implantation ionique pour la réalisation du canal préformé de notre dispositif. Le choix de ces grandeurs a été fixé en tenant compte du cahier des charges pour atteindre la valeur optimale de la tension de seuil.

Puis, nous avons abordé la simulation par ATLAS du comportement électrique de la structure MOSFET, en étudiant d'abord l'effet des charges d'interfaces, puis la distribution du potentiel dans le canal, et enfin les différents réseaux de caractéristiques électriques $I_D(V_G)$, $I_D(V_D)$.

Ensuite, nous avons étudié les effets particulier des polarisations (grille et drain) sur le dispositif : la dégradation de la mobilité des porteurs libre sous l'effet du champ électrique transversal induit par la polarisation de grille, la saturation de la vitesse des électrons dans le canal de conduction sous l'effet du champ électrique latéral, et l'effet de l'impact d'ionisation dû à la polarisation latérale (tension de drain). L'ensemble de ces phénomènes influent sur le comportement du composant électronique et entraîne des effets néfastes sur les performances du transducteur électrique MOSFET, et par conséquent sur la réponse du capteur ISFET.

Pour finir ce chapitre, nous avons étudié les effets de la température sur la réponse (courant de drain) du transducteur électrique. Cette étude nous a permis d'estimer la variation du courant de drain pour une gamme de température définie.

Enfin, nous tenons à rappeler que le MOSFET étudié dans ce travail représente en fait le transducteur électrique de l'ISFET en tant que capteur chimique réel. Nous pouvons prévoir que le comportement électrique de ces deux structures peut être similaire sur un plan expérimental, à la différence que la membrane ionosensible de l'ISFET doit être immergée dans un bain d'électrolyte. Remarquons pour finir que l'étude complète de l'ISFET ne peut se faire sans prévoir la passivation et l'encapsulation du composant final, qui est réalisée sur le plan expérimental, généralement à base de couches de polymères [5,6].

Ces simulations nous ont permis de prévoir le comportement physique à travers les paramètres technologiques, et électriques du composant au moyen des différentes simulations par ATLAS, et par conséquent elles nous donnent l'opportunité d'améliorer les performances du composant électronique.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de notre travail était d'étudier les paramètres technologiques et électriques d'un transistor MOSFET à l'aide du simulateur TCAD-SILVACO, pour la conception d'un capteur chimique de type ISFET

L'étude théorique sur les différents capteurs électrochimiques (conductimétriques, ampérométriques, et potentiométrique), nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement d'un capteur chimique ISFET, à travers l'ensemble des équations qui définissent les différents modes de fonctionnement d'un transistor MOSFET présentant la partie transducteur électrique du capteur chimique. Ainsi, cette étude nous a permis de sélectionner la membrane de nitrure de silicium Si_3N_4 comme la couche ionosensible de ce capteur ISFET. Tout d'abord, nous avons fait une étude sur les phénomènes des réactions à l'interface Electrolyte-Isolant (couche sensible)-Solide, en décrivant le modèle de "site-binding".

La simulation a été effectuée au moyen du simulateur TCAD-SILVACO, qui permet la modélisation du comportement technologique et électrique des composants à base de semi-conducteurs. Nous avons ensuite mis au point, à travers un ensemble de modèles physiques sur lesquels est basé le logiciel, la simulation des différentes étapes de fabrication technologique (oxydation, diffusion, gravure...), à l'aide de l'outil ATHENA de TCAD-SILVACO. L'étude des profils de distribution des porteurs nous a permis d'optimiser la concentration des ions d'arsenic et les profondeurs de jonctions des zones actives (source et drain). L'ensemble des simulations par ATHENA nous a permis d'obtenir un cahier des charges qui regroupe tous les paramètres technologiques et géométriques du dispositif à étudier.

Pour la réalisation du canal préformé de notre capteur ISFET, nous avons optimisé les grandeurs d'implantation ionique dans le but d'ajuster la tension de seuil selon le cahier des charges.

Puis, la simulation électrique du composant par ATLAS, nous a permis d'étudier l'effet des charges d'interface sur la réponse du capteur, et la distribution du potentiel dans le dispositif. Nous avons montré, que les réseaux de caractéristiques électriques obtenus

par simulation sous ATLAS étaient identiques à celles des autres structures présentées dans littérature.

Ensuite, nous avons montré les effets des phénomènes particuliers (dégradation de la mobilité et saturation de la vitesse des électrons dans le canal, et ionisation par impact) des polarisations (grille et drain) sur le dispositif. L'ensemble de ces phénomènes influe sur le comportement du composant électronique et entraîne des effets néfastes sur les performances du transducteur électrique MOSFET, et par conséquent sur la réponse du capteur ISFET.

Enfin, nous avons évalué l'influence de la température sur la réponse du transducteur électrique, nous avons montré que pour une gamme de température de 263⁰K (-10⁰C) à 383⁰K (110⁰C), le courant de drain change considérablement avec un taux de 48 %.

En terme de perspectives, il nous paraît important de développer une manipulation expérimentale pour étudier le comportement électrochimique du capteur chimique ISFET avec une membrane ionosensible de nitrure de silicium conçu et simulé préalablement avec le simulateur TCAD-SILVACO. L'utilisation d'un nouveau type de diélectrique oxynitrure de silicium SiO_xN_y comme couche sensible est notamment prometteuse, car elle pourrait permettre la détection des ions d'hydrogène, avec une meilleure sensibilité.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] J.W. Schultze, T.Osaka , M. Datta, “Electrochemical microsystem technologies“, Taylor and Francis, pp.384, 2002.
- [2] W. Gopel, J. Hesse, J. N. Zemel, “Chemical and biochemical sensors volume 2“, VCH, pp.2, 1991.
- [3] P. Gründler,“ Chemical sensors“, Springer, pp.7-8, 2007.
- [4] A. Hierlemann, “Integrated chemical microsensor systems in CMOS Technology“, Springer, pp.29, 2005.
- [5] B. Torbiero, “ développement de microcapteurs électrochimiques pour l’analyse en phase liquide“, thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [6] I. Humenyuk, “ Développements des microcapteurs chimiques chemfets pour l’analyse de l’eau“, thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2005.
- [7] R.F Taylor, “Handbook of chemical and biological sensors“, IOP Publishing Ltd, 1996.
- [8] H.J. Park, S.Kim, et al,“ An ISFET biosensor for the monitoring of maltose-induced conformational changes in MBP“, FEBS Letters 583, 2009, 157-162.
- [9] C.T. Sah, “Mosfet modeling for Vlsi simulation theory and practice“, World Scientific, pp.69-287, 2006.
- [10] J. P.Colinge, C. A. Colinge,“Physics of semiconductor Devices“, Kluwer Academic Publishers, pp.166-200, 2002.
- [11] Sheng S. Li,“Semiconductor Physical electronics second edition“, Springer, pp.582-583, 2006.
- [12] H. Mathhieu, “Physique des semiconducteurs et des composants électroniques“, Masson, pp.363, 1998.
- [13] K. F. Brennan, A. S. Brown, “Theory of modern electronic semiconductor devices“, Wiley-Interscience Publication, pp.289-298, 2002
- [14] W.Olthuis, “Chemical and physical FET-Based sensors or variations on an equation“, Sensors and Actuators B 105 pp.96-103, 2005.
- [15] S. Kal and Bhanu Priya, Design and modeling of ISFET for pH sensing“, IEEE 10 Conference, pp.1-4, 2007.

- [16] M. W. Shinwari, M. Jamal Deen , D.Landheer,“ Study of The Electrolyte-Insulator Semiconductor Field-Effect Transistor (EISFET) with applications in biosensor design“, *Microelectronics Reliability* 47, 2007, pp.2025-2057.
- [17] L. K. Meixner, S. Koch,“ Simulation of ISFET operation based on the site-binding model“, *Sensors and Actuators B* 6, pp. 315-318, 1992.
- [18] M. P.Gouzy, “Développement d’interfaces adaptées aux analyses biochimiques et biologiques -application aux capteurs chimiques CHEMFETs“, thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2004.
- [19] S. Mohri, et al,“ Application of a flow-through type pH/CO₂ sensor system based on ISFET for evaluation of the glucose dependency of the metabolic pathways in cultured cells “, *Thin Solid Films* 476, 157-161, 2005.
- [20] N. Jafferzic-Renault, “Développement analytiques: microcapteurs électrochimiques pour le suivit in-situ des contaminants“, *Revue F.S.B* 2, pp.92-98, 2003.
- [21] M. Castellarnau et al, “Integrated cell positioning and cell-based ISFET biosensors“, *Sensors and Actuators B* 120, pp.615-620, 2007.
- [22] A. Errachid et al, “New technology for multi-sensor silicon needles for biomedical applicions”, *sensors and actuators B* 78, pp.279-284, 2001.
- [23] S. Mohri et al, “ application of A flow-Through Type pH/CO₂ sensor system based on ISFET for evaluation of the glucose dependency of the metabolic pathways in cultured cells“, *Sensors and Actuators B* 134, pp.447-450, 2008.
- [24] C. Chaneliere, “Réalisation et analyse-caractérisation de dispositifs MOS à Diélectrique de grille en Ta₂O₅“, thèse de doctorat, Ecole doctorale : Sciences pour l’ingénieur de Lyon, 1999.
- [25] T.M. Pan, K.M Liao, “Structural properties and sensing characteristics Of Y₂O₃ sensing membrane for pH-ISFET“, *Sensors and Actuators B* 127, pp.480-485, 2007.
- [26] T. Pan, K. Liao “Study on pH at the point of zero charge of TiO₂ pH Ion-Sensitive Field Effect Transistor made by the sputtering method“, *Thin Solid Films* 476, pp. 157-161, 2005.
- [27] C. Moldovan et al, “ISFET microsensors HfO₂ based for biomedical applications“, *IEEE conference*, pp.185-188, 2006.
- [28] S. Sheng Jan, Y. Chen, et al,“ Effect of Mg²⁺ dopant on the characteristics of lead titanate sensing membrane for Ion-Sensitive field-Effect Transistors“, *Sensors and Actuators B* 108, pp. 883–887, 2005.

- [29] T. Pan, K. Liao, "Influence of oxygen content on the structural and sensing characteristics Of Y_2O_3 sensing membrane for pH-ISFET", *Sensors and Actuators B* 128, 245–251, 2007.
- [30] I. Humenyuk, B. Torbiéro, et al, "Development Of pNH₄-ISFETS Microsensors For Water Analysis", *Microelectronics Journal* 37, pp. 475–479. 2006.
- [31] D. Truyen, "Etude par simulation composant 3D des effets singuliers SEU et SET induits par ions lourds sur le nœud technologique CMOS bulk 180 nm", thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 2007.
- [32] ATHENA user's manual, SILVACO international, 2007
- [33] S. M. Sze, "VLSI technology", McGraw-Hill Book Company, pp.334, 1998.
- [34] ATLAS user's manual, SILVACO international, 2007
- [35] www.silvaco.com
- [36] D. Tomaszewski, C. Yang, et al, "Electrical characterization of ISFETs", *Journal of telecommunications and information technology*, pp.55-60, 2007.
- [37] M. Marrakchi, et al, "Development of trypsin biosensor based on ion sensitive field-effect transistors for proteins determination", *Materials Science and Engineering C* 26, pp.369 – 373, 2006.
- [38] P. Estrela, et al, "Field effect detection of biomolecular interactions", *Electrochimica Acta* 50, pp, 4995–5000, 2005
- [39] M. Castellarnau, et al, "ISFET-based biosensor to monitor sugar metabolism in bacteria", *Materials Science and Engineering C* 28, pp. 680–685, 2008.
- [40] M. Zaborowski, B. Jaroszewicz, et al, "Fabrication of MOS-compatible Ion- Sensitive Devices For Water Pollution Monitoring (Warmer) ", *IEEE 14th conference*, pp.477-481, 2007.
- [41] B. Palàn, "Conception de microcapteurs pH-ISFET faible bruit d'inductance intégrées suspendues à fort facteur de Q", thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 2002.
- [42] M. Kotha, "Optically triggered thyristor for capacitor discharge applications", *memoir de Master*, University of Missouri-Columbia, 2007.
- [43] A. Tuan Mai, " Développement des biocapteurs électrochimiques a base de tyrosinase pour la détection des polluants organiques en phase aqueuse", thèse de doctorat, Institut polytechnique Ha Noi, 2002.
- [44] Anh. Mai, " développement des biocapteurs électrochimiques a base de tyrosinase

- pour la détection des polluants organiques en phase aqueuse“, thèse de doctorat, l’université Claude Bernard - Lyon 1, 2002.
- [45] W. Grabinski et al, “Transistor level modeling for analog/RF IC design“, Springer, pp.38-49, 2006.
- [46] C. Montoro, M. Schneider, “MOSFET modeling for circuit analysis and design“, World scientific, pp.306-313, 2007.
- [47] Y. Cheng, C. Hu, “MOSFET modeling &BSIM3 user’s guide“, kluwer academic publishers, pp.211-215, 2002.

ملخص

إن التحكم في البيئة من حيث مراقبة الفضلات الصناعية أو المنزلية إضافة إلى مشاكل التلوث , الطب, و كل الميادين التي تمس بالكيمياء أو البيوكيمياء تحتاج إلى تقنيات من أجل قياس الظواهر الفيزيوكيميائية أو التعرف على المركبات الكيميائية. في هذا السياق, أجهزة التحسس من النوع ISFET تعطي الحلول المثالية و هذا عن طريق الاختيار الأمثل للطبقة الحساسة المتصلة مباشرة مع المحلول المائي.

في خضم هذا العمل قمنا بدراسة عن طريق المحاكاة, للخصائص التكنولوجية والكهربائية للمركب الإلكتروني ثلاثي الأقطاب MOSFET بواسطة برنامج المحاكاة TCAD-SILVACO وذلك من أجل إنشاء جهاز الإحساس الكيميائي من النوع ISFET. أولاً, قمنا بتصميم بنية المركب الإلكتروني من خلال استعمال البرنامج ATHENA عبر مختلف مراحل تكنولوجيا الميكروإلكترونيك. بعدها, قمنا بدراسة تصرفات المركب الإلكتروني كهربائياً عن طريق البرنامج ATLAS. هذا الأخير سمح لنا بدراسة تأثير الحرارة على المركب الإلكتروني.

Abstract

The environmental monitoring (monitoring of industrial waste or domestic), the problems of pollution, medicine and all topics concerning the chemistry and biochemistry, require techniques for measuring the physico-chemical or detection chemical species. In this context, the chemical sensors ISFET offer innovative solutions by optimizing the interface between the aqueous and the insulation (sensitive layer).

In this work, MOSFET technological and electrical parameters have been study using software SILVACO-TCAD (ATHENA and ATLAS), in order to elaborate chemical sensors ISFET. The device structure has been fabricated with ATHENA tool through different steps of microelectronic technology. Then, the electrical behavior of the electronic component using ATLAS means has been reported. This means allow us, to study the temperature effect on the electrical behavior of the device.

Résumé

Le contrôle de l'environnement (surveillance des rejets industriels ou domestiques), les problèmes de pollution, de la médecine et tous les domaines touchants à la chimie ou la biochimie, nécessitent des techniques pour la mesure des phénomènes physico-chimiques ou pour la détection des espèces chimiques. Dans ce contexte, les capteurs chimiques de type ISFET offrent des solutions innovantes en optimisant l'interface entre le milieu aqueux et l'isolant (couche sensible).

Dans de ce travail, nous avons étudié par simulation avec le logiciel TCAD-SILVACO (ATHENA et ATLAS) les paramètres technologiques et électriques d'un transistor MOSFET pour la réalisation d'un capteur chimique de type ISFET. Tout d'abord nous avons réalisé avec l'outil ATHENA la structure du composant à travers les différentes étapes de la technologie microélectronique. Nous avons ensuite étudié le comportement électrique du composant électronique au moyen de l'outil ATLAS. Ce dernier nous a permis, d'étudier l'effet de la température sur le comportement électrique du dispositif.