

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Électrique Et D'informatique
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Études
De MASTER ACADIMIQUE
Spécialité : **Génie Microélectronique**

Présenté par
HADJALI Dalia

Thème

ETUDE ET APPLICATION DE MICROCAPTEURS : CAS DE FET

Mémoire soutenu publiquement le 24 septembre 2014 devant le jury composé de :

<i>Mr Ahmed MAIDI</i>	<i>UMMTO</i>	<i>Maitre de conférences</i>	<i>Président</i>
<i>Mr Arezki BENFDILA</i>	<i>UMMTO</i>	<i>Professeur</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Mr Ahcene LAKHLEF</i>	<i>UMMTO</i>	<i>Maitre de conférences</i>	<i>Examineur</i>
<i>Mr Takfarinas CHALLI</i>	<i>UMMTO</i>	<i>Maitre de conférences</i>	<i>Examineur</i>

Première promotion 2014



Remerciements

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Microélectronique et Physique des Dispositifs à Semi-conducteurs de l'Université de Tizi-Ouzou.

Je remercie ALLAH le tout puissant pour m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Je tiens à remercier le professeur Arezki BENFDILA, responsable du Laboratoire de Microélectronique, pour m'avoir proposé ce sujet, pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques et sa constante disponibilité.

Que Mr LAKHLEF Ahcene m'avoir aidé et à me prodiguer ses précieux conseils.

Je remercie également les membres du jury qui ont bien voulu examiner le présent travail.

Enfin, je voudrais remercier très chaleureusement mes parents pour leurs soutiens déterminant, et leurs équilibre et envie de réussir.

HADJALI Dalia



Dédicaces



A mes chers parents,

C'est grâce à votre amour, votre immense affection, vos encouragements, la confiance que vous m'avez accordée ainsi vos innombrables sacrifices que j'arrive aujourd'hui au terme de ce travail.

A mes sœurs Thinhinan et Lila. Qui ont jamais hésité à m'aider avec tous les moyens.

A mes chers Grands-parents. (Que Dieu les garde pour moi)

A tous mes oncles et leurs enfants.

A mes meilleurs amis Assia et Fatima pour les bons et les mauvais moments que nous avons passés ensemble.

A mes amis, en particuliers Aghilas, Arezki, Toufik, Arab, Hocine à qui je souhaite le succès, pour l'amitié qui nous a toujours unis.

A tous mes camarades de groupe MGM

A tous ceux qui m'ont aidé à réaliser de près ou de loin ce mémoire ;

A vous tous un grand merci.

HADJALI Dalia

Table des Illustrations

<u>Figure I.1</u> : Principe d'un capteur.....	5
<u>Figure I.2</u> : Constitution d'une chaîne de mesure classique.....	6
<u>Figure I. 3</u> : Schéma de principe des capteurs de pression.....	11
<u>Figure I. 4</u> : principales étapes du procédé lithographique	15
<u>Figure I. 5</u> : tournette pour l'étalement de résine photosensible	16
<u>Figure I. 6</u> : principe de la gravure.....	18
<u>Figure II.1</u> : structure de transistor MOSFET	22
<u>Figure II.2</u> : Variation du courant de drain en fonction De la tension de drain V_d à tension de grille V_g constante	25
<u>Figure II.3</u> : Variation du courant de drain I_D en fonction de la tension de grille V_g	27
<u>Figure II.4</u> : Capteur ISFET	30
<u>Figure II.5</u> : Représentation schématique de la théorie du site-Binding	31
<u>Figure II.6</u> : schéma simplifier des structures MOS et EOS_.....	33
<u>Figure II.7</u> : Réponse au pH d'un capteur ISFET. Variation de la tension de seuil pour des mesures $I_{ds}(V_{gs})$ effectuées dans deux solutions différentes.....	33
<u>Figure III.1</u> : Schéma de transistor MOSFET et ISFET.....	37
<u>Figure III.2</u> : Le modèle équivalent d'ISFET.....	37
<u>Figure III.3</u> : Caractéristique I_{ds} en fonction de V_{ds} à V_{gs} constant ($L = 30 \mu m$)	41
<u>Figure III.4</u> : Réponse d'un ISFET dans trois solutions tampon de pH	42
<u>Figure III.5</u> : La sensibilité du capteur ISFET.....	43
<u>Figure III.6</u> : Variation du potentiel ψ_0 en fonction du pH de la solution	44
<u>Figure III.7</u> : Réponse d'un ISFET dans trois solutions tampon de pH	46
<u>Figure III.8</u> : La sensibilité du capteur ISFET avec une membrane de Si_3N_4	48

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Effets utilisés pour les capteurs passifs..... 7

Tableau I.2 : Effets utilisés pour les capteurs actifs 8

Tableau II.1 : mesure de sensibilité pour différents isolants21

Tableau II.2 : sommaire des couches ionosensibles utilisées dans le capteur ISFET
.....32

Tableau II.3 : Avantages/Inconvénients des capteurs chimiques.....34

Liste des symboles

C_{ox}	Capacité d'oxyde
g_D	Conductance
g_m	Transconductance
I_D, I_{DS}	Courant de drain
K	Constante de BOLTZMAN
L	Longueur du canal
Q	Charge électrique élémentaire
Q_b	Charge dans la zone de déplétion proche de l'interface
Q_{inv}	Charge de la couche d'inversion
Q_m	Charge du métal
Q_{SC}	Charge par unité de surface dans le semi-conducteur
Q_{SS}	Densité surfacique de charges effective due aux charges piégées à l'interface Si-SiO ₂ et aux charges dans le volume de l'oxyde
S	Sensibilité de capteur
T	Température
t_{ox}	Epaisseur de l'oxyde
V_{DS}	Tension drain source
V_{FB}	Tension de Bandes Plates (Flat Band)
V_{GS}	Tension grille source
V_T	Tension de seuil
W	Largeur du canal
x_J	Profondeur des jonctions source-drain.
ϕ_m	Travail de sortie du métal.
ϕ_{ms}	Différence entre les travaux de sortie du métal et du semi-conducteur.

μ	Mobilité des porteurs à faible champ, dans le canal du transistor (à l'interface Si-SiO ₂)
Ψ_0	Potentiel de surface.
Φ_F	Potentiel de Fermi
χ^{sol}	potentiel de surface du solvant
$\Delta\varphi^{lj}$	chute de potentiel entre électrode de référence et la solution
E_{ref}	potentiel d'électrode de référence
pH_{pzc}	pH au point de charge nulle
β	paramètre de sensibilité
C_D	La double couche

ABREVIATIONS

MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MOS	Metal Oxide Semiconductor
ISFET	Ion Sensitive Field Effect Transistor
ChemFET	Chemical Field Effect Transistor
ISE	Ion Sensible Electrode
EIS	Electrolyte Isolant Silicium
EOS	Electrolyte Oxyde Semi-conducteur
pH	Potentiel Hydrogène
IC	Intigrated circuit
LPCVD	Laser Assisted Chemical Vapor Deposition
CVD	Chemical Vapor Deposition
PECVD	Plasma Enhanced CVD
Ddp	Différence De Potentiel
SC	Semiconducteur

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralité sur les Capteurs et Microcapteurs

I.1. Introduction.....	4
I.2. les capteurs.....	4
I.2.1. Généralité et définitions	4
I.2.2. Différents types des capteurs.....	11
I.3. Les microcapteurs	13
I.3.1. L'intérêt de l'intégration	13
I.3.2. Pourquoi la miniaturisation	13
I.3.3. Le matériau	14
I.4. Technologie de fabrication des capteurs et microcapteurs	14
I.4.1. dépôt de couches minces	14
I.4.2. La photolithographie	15
I.4.3. Gravure	16
I.5. Conclusion	18

CHAPITRE II : Etude de Microcapteur Chimique à base de FET

II.1. Introduction	20
II.2. Electrode a ions spécifique	21
II.3. MOSFET	22
II.4. ISFET	26
II.4.1. Définition de L'ISFET	26
II.4.2. Principe de fonctionnement	27
II.4.3. Principe physico-chimique de détection.....	28
II.4.4. Détermination du potentiel chimique ψ	28
II.4.5. Détection du pH.....	31
II.4.6. Méthode de mesure :.....	33
II.4.7. Les inconvénients et les avantage d'un ISFET.....	34
II.5. Conclusion :	35

CHAPITRE III : Modélisation et Simulation de l'ISFET

Introduction.....	37
partie1 : modélisation	41
partie2 : simulation.....	41

III.1.caractéristique électrique de l'ISFET	42
III.2.Détection du pH.....	44
III.3.Interprétation	44
III.4.Implantation de la membrane Si ₃ N ₄	47
Conclusion	49
Conclusion générale	51
Bibliographie	53

Introduction générale

Les capteurs sont largement utilisés dans divers domaines et sont employés dans la vie de tous les jours pour transformer des événements mécaniques, chimiques ou thermiques en signal électrique. Ils forment ainsi une partie centrale et fondamentale de l'interface entre le monde physique et le monde électrique. Les cinquante dernières années et plus spécialement la première décennie du XXIème siècle ont été le siège d'un réel progrès technologique et d'énormes avancées dans les activités capteurs [1].

Au cours des dernières années [2], motivé par des objectifs de performances et de réduction des coûts plusieurs d'études et investigation motivé ont été en fait on distingue notamment la miniaturisation de plusieurs systèmes : mécaniques, électromécaniques, thermiques, fluidiques. C'est cette volonté de miniaturisation qui a contribué à la naissance des capteurs miniaturisé appelé Microcapteurs ou MEMS.

Les microcapteurs ont connu un développement remarquable sous la pression de trois facteurs principaux à savoir :

- Le besoin en capteurs fiables qu'entraîne la croissante sévérité des normes dans les domaines tels que l'environnement, la santé, l'agroalimentaire,
- La généralisation de l'automatisation dans le génie des procédés ;
- La réduction du cout en vue de généraliser la technologie dans les différents domaines de la vie de tous les jours.

Dans ses perspectives ce mémoire traite des capteurs en générale et étudier les capteurs chimique sous forme d'un transistor (ISFET) en particuliers, développés en 1970 par P. Bergveld [3]. Nous présenterons donc brièvement les caractéristiques d'un tel dispositif, avant de nous intéresser plus particulièrement aux équations qui régissent son fonctionnement, que nous essayons de résoudre par la simulation.

Ce mémoire s'articulera autour de trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous dressons un état de l'art sur les capteurs et les microcapteurs. Le deuxième chapitre traite des capteurs chimiques en générale et de l'ISFET en particuliers. Nous avons d'écrit leur principe de fonctionnement, la détection du potentiel chimique et la détection du pH, nous traitons aussi des membranes ionosensibles.

Le dernier chapitre composé de deux parties traite la modélisation de l'ISFET et des résultats obtenue en simulation.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale et les perspectives.

Chapitre 1
Généralités sur les Capteurs
et Microcapteurs

I.1. Introduction

Dans le monde industriel, il est nécessaire d'avoir accès à une grandeur non électrique.

Cette connaissance permet de connaître l'état physique d'un système et de pouvoir prendre des décisions quant à la conduite de celui-ci. Les décisions peuvent être automatiques.

Dans les deux cas, l'état physique du système doit être connu sous la forme d'une grandeur électrique : tension ou courant car les systèmes de traitement n'utilise que ces grandeurs. L'opération qui permet de transformer une grandeur physique en une grandeur électrique est réalisée par un capteur. Mais grâce aux avancées technologiques de ces dernières années, principalement dans le domaine de la miniaturisation, les capteurs sont devenus des éléments de très petite taille (micro-capteur) [4].

Les micros capteurs agissent comme des yeux, etc. Ils rassemblent constamment les données venant de l'environnement ambiant et transmettent cette information aux parties microélectroniques pour leur traitement. Les capteurs peuvent surveiller les interprétations mécaniques, thermiques, chimiques, optiques et magnétiques à partir de l'environnement ambiant [5].

I.2. les capteurs

I.2.1. Généralité et définitions

- **Capteur**

Le capteur est le premier élément de la chaîne de mesure. Il transforme les grandeurs physiques ou chimiques non électriques en un signal électrique.

La grandeur à mesurer est appelée mesurande « m ». Le rôle du capteur est donc de convertir « m » en une grandeur électrique qu'on appellera la mesure « s » [6] et qui peut être une impédance ou une charge, un courant ou une différence de potentiel (ddp) On parle aussi de transducteur. Il permet de transformer la grandeur physique d'entrée (le mesurande) en une autre grandeur physique de sortie ou en un signal électrique.

La fonction $s = F(m)$ dépend souvent d'autres grandeurs physiques propres à l'environnement (température, humidité, etc.). Ces grandeurs sont appelées grandeurs d'influence.

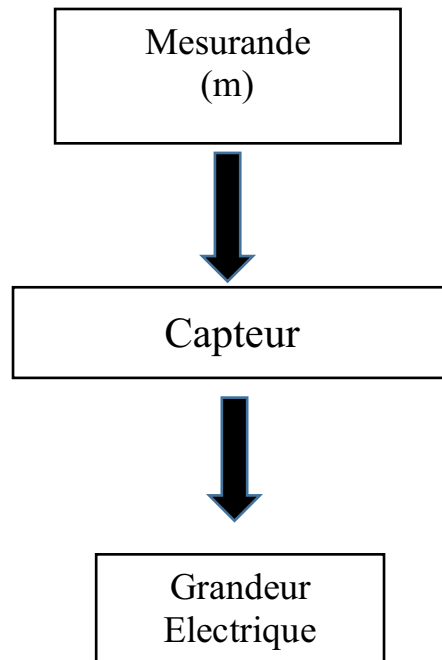


Figure I.1 : Principe d'un capteur.

Généralement, on obtient une grandeur de sortie du type électrique. Elle peut être soit :

- Une charge,
- Une tension,
- Un courant,
- Une impédance (R, L, C).
- Fréquence,

En général, le signal donnée par le capteur n'est pas directement utilisable et a besoin d'être amplifié, adapté, converti, linéarisé, échantillonné [6]. L'ensemble des circuits et appareils qui assure ces opérations est appelé chaîne de mesure.

- **Chaîne de mesure**

Pour obtenir une image d'une grandeur physique, on fait appel à une chaîne de mesure qui peut faire intervenir plusieurs phénomènes différents. La mesure d'un débit, par exemple, peut se faire en plusieurs étapes [6] :

- Transformation du débit en une pression différentielle,

- Transformation de la pression différentielle en la déformation mécanique d'une membrane,
- Transformation de la déformation mécanique en une grandeur électrique (à l'aide d'un piézo-électrique) via un circuit électronique associé.

L'ensemble de ces étapes constitue la chaîne de mesure.

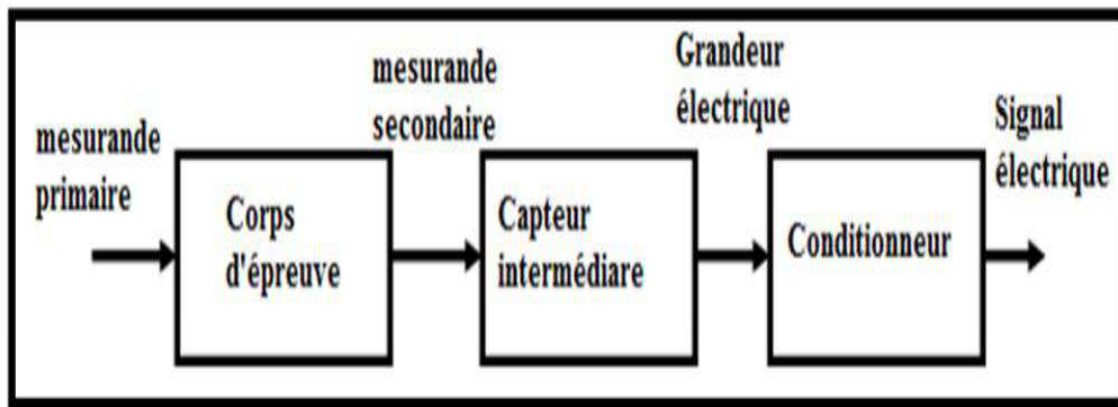


Figure I.2 : Constitution d'une chaîne de mesure classique.

Dans la plupart des cas, la sortie d'une chaîne de mesure est du type électrique. Si la chaîne de mesure fait intervenir plusieurs transducteurs, on appelle corps d'épreuve celui en contact direct avec le mesurande. Le dernier transducteur est associé à un conditionneur qui fournit la grandeur électrique de sortie de manière exploitable.

Le choix de ce conditionneur est une étape importante dans le cadre de la chaîne de mesure car, associé au capteur, il détermine la nature finale du signal électrique et va influencer les performances de la mesure.

- **Étalonnage des capteurs**

L'étalonnage est l'opération qui établit la relation entre le mesurande et la grandeur électrique de sortie. Cette relation peut dépendre non seulement du mesurande mais aussi des grandeurs d'influence. S'il n'y a pas de grandeurs d'influence, l'étalonnage est simple, sinon il est multiple.

- **Classification des capteurs**

On peut classer les capteurs en deux grandes familles en fonction de la caractéristique électrique de la grandeur de sortie. Cette classification influe sur le conditionneur qui lui est associé. [6]

- a. Capteurs passifs**

Le capteur se comporte en sortie comme un dipôle passif qui peut être résistif, capacitif ou inductif.

Le tableau ci-dessous résume, en fonction du mesurande, les effets utilisés pour réaliser la mesure.

Mesurande	Effet utilisé (grandeur de sortie)	Matériaux
Température	Résistivité	Platine, nickel, cuivre, SC
Flux optique	Résistivité	SC
Déformation	Résistivité	Alliages de nickel
Position	Résistivité	Magnétorésistances : Bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

Tableau I.1 : Effets utilisés pour les capteurs passifs.

- b. Capteurs actifs**

Dans ce cas, la sortie du capteur est équivalente à un générateur. C'est un dipôle actif qui peut être du type courant, tension ou charge. Les principes physiques mis en jeu sont présentés sur le tableau 1.2.

Mesurande	Effet utilise	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité (thermocouple)	Tension
Flux optique	Photoémission Effet photovoltaïque	Courant Charge
Force, pression, Accélération	Piézoélectricité	Charge
Position	Effet Hall	Tension
Vitesse	Induction	Tension

Tableau I.2 : Effets utilisés pour les capteurs actifs.

➤ **Caractéristiques d'un capteur : définition métrologique**

De manière à classer les capteurs en fonction de leurs performances, nous sommes amenés à définir des paramètres qui permettent de les sélectionner en fonction de l'application.

• **Etendue de la mesure**

Elle définit la zone dans laquelle les caractéristiques du capteur sont assurées par rapport à des spécifications données. On peut classer cette zone en trois familles.

a. Zone nominale d'emploi

Zone dans laquelle le mesurande peut évoluer sans modification des caractéristiques du capteur.

b. Zone de non-détérioration

C'est une zone définie par des valeurs limites des grandeurs influençant le capteur (mesurande, température environnante, etc...) sans que les caractéristiques du capteur ne soient modifiées après annulation de surcharges éventuelles.

c. Zone de détérioration

Dans laquelle, le capteur peut y avoir des modifications permanentes des caractéristiques.

- **Seuil**

Le seuil d'un capteur est la valeur minimale du mesurande à partir de laquelle le capteur devient sensible. En dessous de cette valeur le capteur ne mesure rien et il affiche une valeur nulle.

- **Hystérésis**

L'hystérésis consiste au non coïncidence entre la courbe de charge et celle de décharge c'est-à-dire la mesure par valeurs croissantes et par valeur décroissantes.

- **Résolution**

Elle correspond à la plus petite variation du mesurande que le capteur est difficile de repérer.

➤ **Caractéristique d'entrée-sortie d'un capteur**

Elle donne la relation d'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée. Elle est donnée classiquement par une courbe en régime permanent. Elle ne donne pas d'informations sur les caractéristiques transitoires du capteur.

- **Sensibilité**

Elle détermine l'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée en un point donné. C'est la pente de la tangente à la courbe issue de la caractéristique du capteur.

Dans le cas d'un capteur linéaire, la sensibilité du capteur est constante.

$$\text{Sensibilité} = \frac{\Delta(\text{grandeur de sortie})}{\Delta(\text{mesurande})} \quad 1.1$$

- **Finesse**

C'est une précision qui permet d'estimer l'influence de la présence du capteur et de ses liaisons sur la valeur du mesurande .la finesse doit être la plus grande possible.

- **Linéarité**

Zone dans laquelle la sensibilité du capteur est indépendante de la valeur du mesurande.

- **Rapidité**

C'est la qualité d'un capteur à suivre les variations du mesurande. On peut la chiffrer de plusieurs manières :

- Bande passante du capteur. (à -3 dB par exemple).

- Fréquence de résonance du capteur.
- Temps de réponse (à x%) à un échelon du mesurande.

- **Temps de réponse**

C'est l'aptitude d'un capteur à répondre aux variations du mesurande avec le temps.

Si on prend, par exemple, notre thermomètre affichant 20°C et on le place dans un four à 100°C, il prendra un certain temps τ pour afficher 100°C : τ est appelé temps de réponse.

➤ **Caractéristiques statistiques d'un capteur**

Ces paramètres permettent de prendre en compte la notion d'erreurs éventuelles qui peuvent survenir sur un capteur.

a. Fidélité

Elle définit la qualité d'un capteur à délivrer une mesure répétitive sans erreurs.

L'erreur de fidélité correspond à l'écart type obtenu sur une série de mesures correspondant à un mesurande constant.

b. Justesse

C'est l'aptitude d'un capteur à délivrer une réponse proche de la valeur vraie et ceci indépendamment de la notion de fidélité. Elle est liée à la valeur moyenne obtenue sur un grand nombre de mesures par rapport à la valeur réelle.

$$\langle m \rangle = \sum \frac{m_i}{n} \quad 1.2$$

c. Précision

Elle définit l'écart en % que l'on peut obtenir entre la valeur réelle et la valeur obtenue en sortie du capteur. Ainsi un capteur précis aura à la fois une bonne fidélité et une bonne justesse.

$$\sigma = \sqrt{\frac{m_i - \langle m \rangle^2}{n^2}} \quad 1.3$$

d. incertitude

C'est la marge d'erreur ΔR entre la valeur donnée par l'appareil de mesure et la vraie valeur du mesurande. L'erreur relative donne une meilleure appréciation sur l'incertitude d'un appareil de mesure. Par exemple, pour un thermomètre dont l'incertitude est de 1% et qui affiche 20°C, la vraie valeur de la température est :

$$T_{réelle} = T_{mesurée} \pm \Delta T \quad \text{I.4}$$

I.2.2. Différents types des capteurs

Il existe dans l'industrie plusieurs capteurs qui peuvent être classés suivant leurs natures (actifs ou passifs) ou suivant le phénomène physique qui est à l'origine de leurs fonctionnements. On cite à titre d'exemple quelques types des capteurs les plus utilisés [7].

✓ Capteurs de pression

Dans tous les cas, les capteurs de pression peuvent se ramener au schéma ci-dessous. Le corps d'épreuve est l'élément mécanique qui, soumis aux variations de la grandeur à mesurer a pour rôle de transformer celle-ci en grandeur physique mesurable.

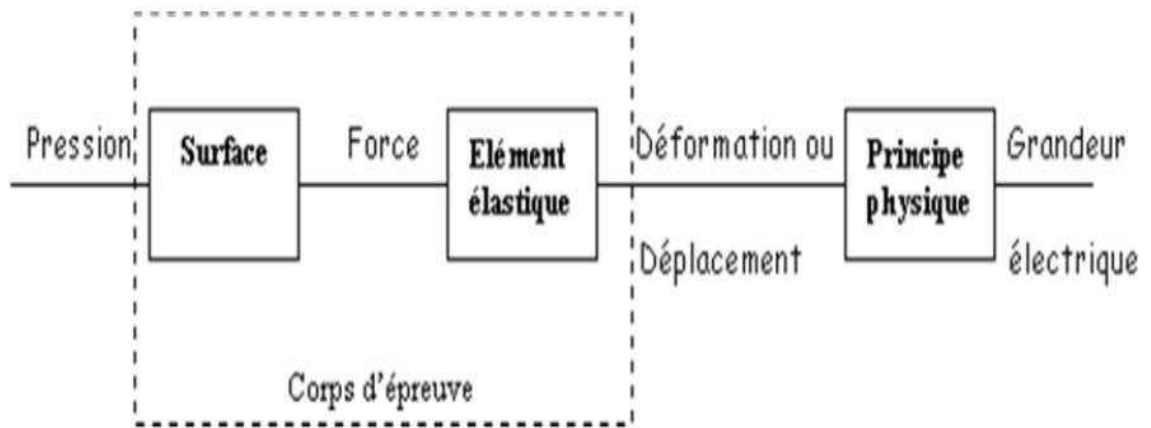


Figure I.3 : Schéma de principe des capteurs de pression.

✓ Capteurs d'accélération

Un accéléromètre est un capteur qui, fixé à un mobile, permet de mesurer l'accélération de ce dernier. Le principe de tous les accéléromètres est basé sur la loi fondamentale de la dynamique :

$$\vec{F} = m \vec{\gamma} \quad \text{I.5}$$

✓ **Capteurs d'humidité**

La mesure d'humidité est difficile à mettre en œuvre. L'humidité dans l'air est mesurée généralement comme la fraction maximum d'eau qui peut être absorbée à une certaine température. Les techniques de détection les plus utilisées sont la détection résistive et la détection capacitive.

✓ **Capteurs de position**

Les capteurs de position sont des capteurs de contact. Ils peuvent être équipés d'un galet, d'une tige souple et d'une bille. L'information donnée par ce type de capteur est de type tout ou rien et peut être électrique ou pneumatique.

✓ **Capteurs de température**

De toutes les grandeurs physiques, la température est certainement l'une dont la mesure est la plus fréquente. La température détermine en effet de façon décisive les propriétés de la matière. Sa mesure n'est pas directe, mais à travers un phénomène associé tel que la variation de résistance d'un conducteur électrique, la dilatation d'un fluide ou l'émission d'un rayonnement thermique.

✓ **Capteur chimique**

Les capteurs chimiques sont généralement des systèmes simples, constitués d'une couche sensible permettant la reconnaissance de l'espèce avec laquelle elle interagit et d'un système transducteur transformant l'interaction chimique en un signal électrique. Souvent, les deux fonctions sont intimement liées.

Les avantages principaux des capteurs chimiques sont : leur faible encombrement, leur faible consommation énergétique, leur faible coût, des temps de réponse relativement courts. Tous ces avantages en font des instruments idéaux pour les mesures sur site et le contrôle de procédé. Par contre, l'analyse de mélanges complexes nécessite l'emploi d'un grand nombre de capteurs sensibles à l'une ou l'autre espèce.

I.3. Micro-capteur

I.3.1. L'intérêt de l'intégration [08]

- Augmenter la rapidité.
- Réduire le bruit (Filtrage, adaptation d'impédance, modulations ...).
- Diminution des distances « capteurs –électronique ».
- Intégration du conditionneur de capteurs passifs.
- Intégration du conditionneur du signal (linéarisation, contre-réaction etc...).
- Conversion analogique / numérique.
- Enregistrements.
- Communications.
- Gestion de l'affichage.
- Implémentation de capteurs sur le même « chip » (élimination des grandeurs d'influence).
- Intégration de dispositifs de régulation (ex : régulation de T°).
- Autotests de fonctionnement.

I.3.2. Pourquoi la miniaturisation [9]

- Réduction de la taille et du poids.
- Réduction de la consommation énergétique.
- Amélioration des performances (vitesse, sensibilité...).
- Production collective de composants individuels.
- Réduction des coûts.
- Nouvelles propriétés et fonctionnalités.
- Motivations scientifiques : explorer des 'objets' plus petits.
- Prédominance de certains phénomènes physiques.
- Fréquences de fonctionnement et largeur de bande élevées.
- Grande fiabilité électronique.
- Constantes de temps thermiques faibles.

I.3.3. Le matériau [9]

Le silicium est le matériau le plus utilisé pour la fabrication des micros capteurs.

En effet, il est :

- ✓ Très répandu (fabrication de CI).
- ✓ Très grande pureté (99,9999999%).
- ✓ Facilement micro usiné.
- ✓ Fortement piezorésistifs.
- ✓ Semi-Conducteur (l'intégration des fonctions capteurs et actionneurs avec l'électronique associée).
- ✓ Très bonnes propriétés physiques :
 - Limite d'élasticité : 7 GPa.
 - Bon conducteur thermique.
 - Propriétés optiques peu intéressantes.
 - Ses propriétés varient avec la température.
 - Il garde son intégrité jusqu'à 500°C.
 - Matériau stable.

I.4. TECHNOLOGIE DE FABRICATION DES CAPTEURS ET MICROCAPTEUR

On peut classer les étapes de fabrications issues de la microélectronique sur silicium en trois catégories : les techniques additives (dépôt de couches mince, épitaxie,...), les techniques sélectives ou de transfert de motifs telles que la photolithographie et les techniques soustractives de gravure.

I.4.1. Dépôt de couches minces

De nombreux procédés de micro usinage sont basés sur la technologie du dépôt de couches minces. Le choix de la nature d'une couche mince de métal à utiliser dans un micro-capteur dépend essentiellement de l'application visée. Elles consistent à déposer des couches de différents matériaux les unes sur les autres depuis un gaz, un plasma, une solution aqueuse ou un état solide. On peut déposer des métaux, du polysilicium, des oxydes et nitrures de silicium, des polymères, etc. Les épaisseurs de couches obtenues et leurs caractéristiques (électriques, piézoélectrique, mécanique...) sont très dépendantes des procédés utilisés : PVD, CVD, oxydation, etc. Ces procédés dépendent des paramètres tels que la température, l'inclinaison de

wafer et sa topologie et la composition de l'atmosphère dans la machine. On adjoint souvent une étape de traitement thermique après la déposition pour obtenir les caractéristiques désirées.

I.4.2. La photolithographie

Le principe de la photolithographie consiste à irradier un film de matériau photosensible, appelé résine, au travers d'un masque ou est définie l'image du circuit. Une partie de l'intensité lumineuse est absorbée par la couche, engendrant des modifications physico-chimiques de la résine, les zones exposées deviendront solubles, dans le cas des résines positives, ou insolubles, quand il s'agit de résines négatives. Après une étape de développement, les motifs de la résine apparaissent, créant à leur tour un masque sur le substrat. Ce masque permet ensuite de délimiter les régions du substrat de silicium qui subiront un traitement (gravure, implantation).

✓ Principe de photolithographie

Cette opération consiste à déposer une photosensible en film mince et uniforme. Ces résines sont des composés organiques dont la solubilité est affectée par le rayonnement UV. Selon la source d'irradiation, plusieurs techniques par rayon X, par faisceaux d'électrons ou d'ions et la photolithographie.

Même si le développement technologique propose de nouvelles techniques capables de réduire significativement la dimension des motifs imprimés, la photolithographie reste la plus employée en industrie car elle permet des cadences de production élevées.

La figure I.4 présente les étapes de photolithographie

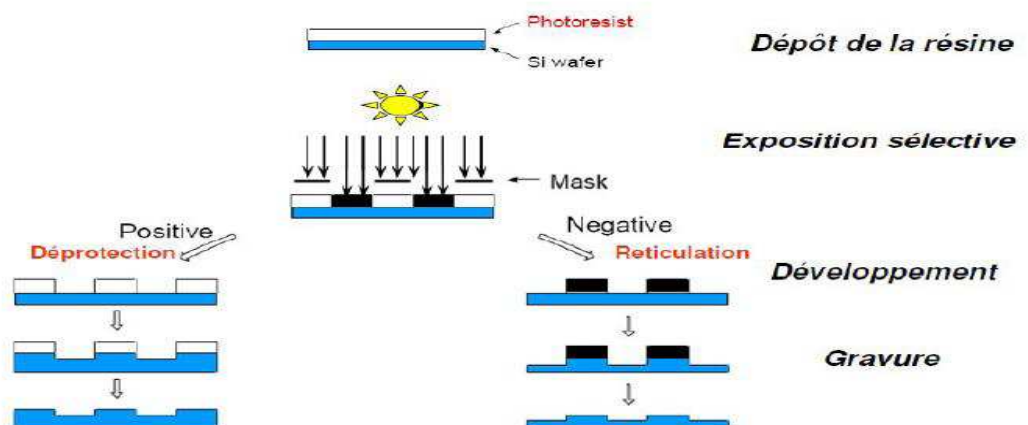


Figure I.4 : principales étapes du procédé lithographique [10]

✓ **Réalisation d'un motif sur plaquette**

En général l'opération de la photolithographie se déroule de la façon suivante [10] :

1. Étalement de la résine photosensible par centrifugation : le substrat de silicium est fixé par aspiration sur support tournant, une quantité de résine de façon quasi uniforme en un film mince de quelques microns.
2. Séchage de la résine pour évacuer le solvant,
3. Exposition de la résine à un rayonnement ultraviolet à travers un masque,
4. Développement de la résine. Le bain de développement va dissoudre soit la partie de résine insolée dans le cas d'une résine dite positive, soit la résine non insolée dans le cas d'une résine négative,
5. La résine restante est ensuite retirée de la surface par des solvants chimiques puissants,

Dans le cas d'une résine positive, on retrouve après l'opération, exactement le même motif sur la couche gravée de la plaquette, que sur le masque de départ. Par exemple, à un motif de métal sur le masque (correspondant à un motif opaque), correspond le même motif d'oxyde restant sur la plaquette après gravure. Dans le cas d'une résine négative, on obtient sur la plaquette le motif complémentaire.

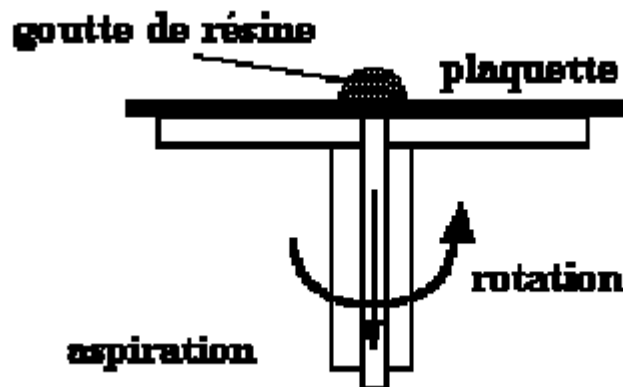


Figure I.5 : tournette pour l'étalement de résine photosensible [10]

I.4.3.Gravure

La gravure est une méthode de transfert soustractive, c'est à dire que la structure est formée par un enlèvement de matière du substrat ou d'une couche sous-jacente via les ouvertures d'un masque de résine. Cette attaque chimique et/ou physique des parties de la surface non protégées par les masques peut être réalisée en milieu liquide (gravure humide) ou en milieu gazeux (gravure sèche par plasma).

✓ Gravure chimique

La gravure par attaque chimique est la technique la plus répandue. Elle est obtenue en plongeant un substrat de silicium dans des bains chimiques après la phase de photolithographie. La vitesse d'attaque est fonction de la concentration des différents composants. Les produits d'attaque du silicium sont nombreux :

- EDP : éthylène diamine pyrocathécol ;
- KOH : mélange de potasse et d'eau ;
- HNA : acide fluorhydrique (HF) et acide nitrique (HNO₃) dilués dans de l'acide acétique (CH₃COOH)...

Les deux types de gravure peuvent avoir un caractère [11] :

- Isotrope : le profil de la gravure est symétrique dans toutes les directions de la région attaquée
- Anisotrope : une direction donnée est privilégiée, permettant d'obtenir des profils de gravure directionnels.

✓ Gravure par voie sèche

Si la gravure humide permet l'usinage de volume du silicium (sur plusieurs dizaines, voire centaines de microns de profondeur), cette technique est fortement dépendante de la structure du silicium, rendant impossible la réalisation de certaines géométries. Les techniques utilisées en gravure sèche (laser, plasma) attaquent verticalement le silicium, permettant la création de motifs courbes. Cependant la profondeur de gravure n'excède pas quelques microns (on parle d'usinage de surface) pour les procédés classiques, ce qui limite fortement leur champ d'application. La technique la plus répandue est la gravure par plasma schématisée en figure I.6. Le plasma utilisé est un gaz ionisé possédant sensiblement le même nombre de particules chargées positivement et négativement. La gravure est effectuée dans une chambre à vide à l'aide d'un bombardement d'ions qui arrachent des atomes de silicium sur les parties non protégées du wafer, la protection ayant été réalisée au préalable par micro photolithographie.

Cette dernière méthode est plus intéressante car elle permet d'augmenter considérablement la densité des ions réactifs et ainsi la vitesse de gravure.

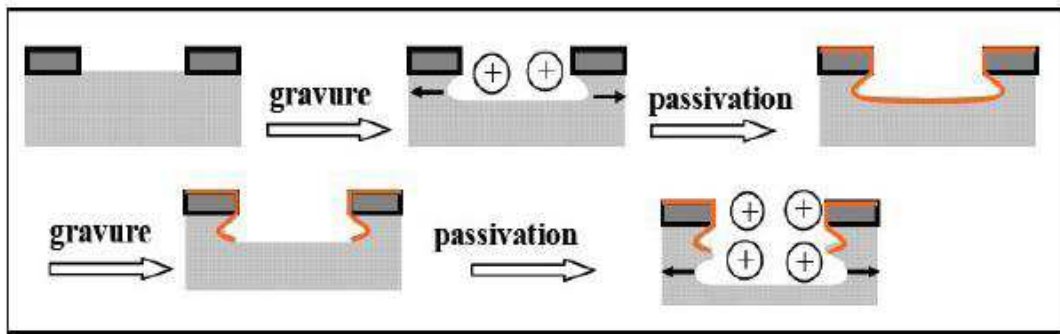


Figure I.6 : principe de la gravure [11]

I.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un état de l'art sur les capteurs et leurs caractéristiques ainsi différentes types des capteurs. Nous avons ensuite établi un bilan sur les microcapteurs et leurs méthodes standard de fabrication. Nous allons maintenant entrer dans l'étude de ChemFET.

Chapitre 2
Etude de Microcapteur
Chimique à base de FET

II.1.INTRODUCTION

Durant ces dernières années, le domaine des capteurs chimiques à effet de champ ou ChemFETs (Chemically Modified Field Effect Transistors) a connu un développement remarquable. Ceci étant le résultat de trois facteurs principaux qui ont à la fois vivement animé la recherche dans ce domaine et fortement incité à développer de nouveaux capteurs. Le premier de ces facteurs est le besoin très vif en capteurs fiables qu'entraîne la croissante sévérité des normes dans tous les domaines à savoir : environnement, alimentation, pharmacie, sécurité domestique et industrielle, monitoring médical, etc. Le second facteur est lié à la généralisation de l'automatisation dans le génie des procédés. Quant au troisième facteur, celui-ci fait appel à l'intrusion récente en force des méthodes de micro fabrication de l'électronique dans la technologie de réalisation des capteurs [12]. Ce dernier point est sans doute le plus notable car il donne accès au domaine des fabrications collectives avec les avantages qui lui sont liés de bas coût d'où les capteurs jetables deviennent envisageables, de gain en fiabilité et d'adaptation aux microcircuits. Ces avantages ont naturellement orienté la conception des capteurs vers la miniaturisation à l'échelle micro / millimétrique.

Grace à leur petite taille, leur réponse rapide, leur production en volume élevée en plus, d'une basse impédance de sortie et la possibilité d'intégration de l'électronique avec le capteur sur une même puce, les ISFETs ont pu s'imposer dans l'industrie par rapport aux électrodes de mesures de pH en verre (la méthode la plus courante utilisée pour mesurer le pH). Tous ces avantages sont réunis pour rendre ces capteurs largement utilisables dans le domaine biomédical.

Ce chapitre permet d'avoir un travail de recherche bibliographique portant sur les capteurs chimiques de type ISFET tout en décrivant leur principe de fonctionnement, la détection du potentiel chimique et la détection du pH, nous traitons aussi des membranes ionosensibles.

II.2.ELECTRODE A IONS SPECIFIQUE

Les électrodes ionosensibles sont des instruments de mesure classiques destinés à la mesure de la concentration des ions spécifiques dans divers environnements. Ces capteurs sont en fait constitués de deux électrodes, l'une munie d'une membrane sélective à un type d'ion et l'autre de référence. Son principe de fonctionnement repose sur l'établissement d'un équilibre électrochimique à l'interface électrode solution ; la différence de potentiel à cette interface est alors proportionnelle au logarithme de la concentration de l'ion à détecter [13].

Le capteur type de cette famille est certainement celui destiné à la mesure du pH. Le potentiel hydrogène (pH) indique la concentration en ions H_3O^+ présents dans une solution ; ou plus précisément le cologarithme décimal de cette concentration exprimée en mole/litres :

$$pH = -\log ([H_3O^+]) \quad 2.1$$

L'équation de NERNST décrit le comportement de l'électrode :

$$E = E_0 - 2,3 \text{ kT}/e \text{ (pH)} \quad 2.2$$

Où :

E : est la ddp mesurée aux bornes des deux électrodes

E0 : est lié au potentiel de l'électrode de référence

k : est la constante de Boltzmann

e : est la charge élémentaire

T : est la température en Kelvin

Le potentiel varie linéairement en fonction du logarithme décimal des concentrations des espèces oxydantes et réductrices.

A température ambiante (25°C), la pente est limitée à $2,3 \text{ kT}/e \approx 60 \text{ mV/unité}$. Cette pente représente la sensibilité de détection et détermine par conséquent la qualité du capteur chimique. Lorsque la sensibilité est inférieure à cette valeur maximale, on parlera de réponse non-Nernstienne [13].

Isolants	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃	Ta ₂ O ₅
Mesure de pH	2-12	2-12	2-12
Mesure de sensibilité (mV/pH)	53-55	54-56	56-58

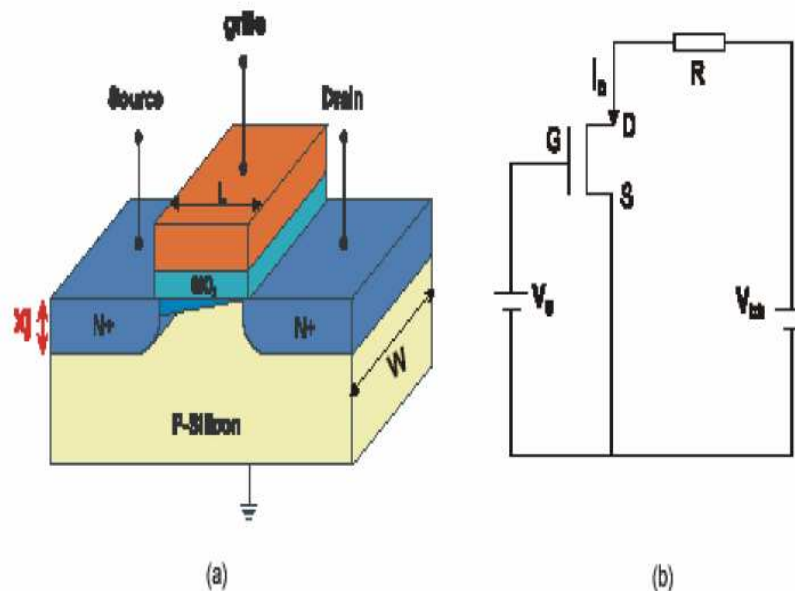
TableauII.1 : mesure de sensibilité pour différents isolants [14]

II.3.MOSFET

Le transistor MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) constituée d'un substrat de silicium de type n ou p dans lequel sont implantées, par diffusion ou implantation ionique, deux zones, fortement dopées et de type opposé à celui du substrat, appelées drain et source. Sur la zone limitée par le drain et la source (appelée zone active), est déposée une couche de diélectrique par oxydation du silicium (substrat). Le diélectrique ainsi obtenu, le SiO_2 natif, est recouvert d'une couche, pouvant être du polysilicium de haute conductivité et/ou de l'aluminium, appelée grille. Une capacité MOS est ainsi réalisée, voir figure II.1.

La couche active liant la source et le drain, activée par polarisation, est appelée canal. Selon sa présence ou son absence et en l'absence de toute polarisation, le transistor peut être à appauvrissement (Normally On) ou à enrichissement (Normally Off).

Indépendamment du type du transistor, un MOSFET est caractérisé par ses dimensions géométriques et physiques qui sont décrites ci-dessous et montrés par la figure II.1



FigII.1 : (a) : schéma d'un transistor (b) : schéma électrique d'un transistor MOSFET [15].

On appelle L et W la longueur et la largeur du canal du MOSFET respectivement. X_j représente la profondeur de diffusion de la source et du drain et t_{ox} l'épaisseur de l'oxyde de grille. La surface de la grille est $A = W.L$ et x la profondeur du canal.

La grille et le drain sont polarisés par les tensions V_{GS} et V_{DS} référencées par rapport à la source ou au substrat, tous deux généralement maintenus à la masse afin de contrôler la conductivité du canal et le courant du drain traversant longitudinalement le canal.

Le dopage du substrat varie entre 10^{15} et 10^{17} atomes/cm³. Celui du drain et source par contre, est de l'ordre de 10^{19} atomes/cm³. Le canal est physiquement séparé de l'oxyde par l'interface qui influe sur le comportement et les performances du MOSFET [15].

Le principe de fonctionnement du MOSFET consiste à moduler, par la tension de polarisation grille source, V_{GS} , la conductance du canal. Cette modulation est effective à partir d'une tension V_{GS} appelée tension de seuil V_T . La tension effective de modulation de la conductivité du canal est $(V_{GS} - V_T)$.

Selon la valeur de la tension de grille V_{GS} on peut définir plusieurs zones de fonctionnement :

- 1) $V_{GS} = 0$: le canal est saturé en porteurs majoritaires, les trous. Aucun courant ne peut circuler entre la source et le drain.
- 2) $0 < V_{GS} < V_T$ (V_T = tension de seuil) – les trous sont repoussés vers le substrat.

C'est le régime de déplétion. Aucun courant ne peut circuler dans le canal entre la source et le drain.

- 3) $V_{GS} > V_T$: les trous du substrat dans le canal seront repoussés pour laisser la place aux porteurs minoritaires, les électrons. Si maintenant le drain est porté à un potentiel V_d supérieur à celui de la source, alors les électrons s'écoulent de la source vers le drain en créant un courant de drain I_d .

La tension de seuil, V_T , est donnée par l'équation :

$$V_T = \frac{\phi_M + \phi_{SI}}{q} + \frac{Q_b + Q_{ss} + Q_{ox}}{C_{ox}} + 2\phi_f \quad 2.3$$

.Selon V_d , on distingue deux régimes de fonctionnement :

- 1) $V_d < V_g - V_T$: le régime est dit linéaire, le courant de drain est donné par l'équation :

$$I_d = B \left[(V_g - V_T)V_d - \frac{V_d^2}{2} \right] \quad 2.4$$

Avec $B = \frac{\mu C_{ox} \omega}{L}$

Où μ : représentent la mobilité des électrons dans le canal, C_{ox} : est la capacité de l'isolant, ω et L : sont la largeur et la longueur du canal respectivement.

Puis, au fur à mesure que la tension de drain augmente, la densité des électrons dans la couche d'inversion diminue, l'épaisseur de la couche d'inversion se réduit à zéro, et la conductivité du canal va jusqu'à s'annuler au voisinage du drain. On parle de pincement (Pinch-off) du canal au niveau du drain [16]. Dans ce cas, la tension de drain $V_d = V_g - V_T$. La tension de drain et le courant de drain sont donc appelés tension de saturation et courant de saturation, respectivement (figure II.3)

- 2) $V_d \geq V_g - V_T$: lorsque la tension de drain augmente au-delà de la tension de saturation, le point de pincement se déplace vers la source et le courant de drain reste quasiment constant. Dans cette région, on est en régime dit de saturation, et l'expression du courant de drain est donnée par l'équation (II.4) :

$$I_{dsat} = B(V_g - V_T)^2 \quad 2.5$$

Où μ est la mobilité moyenne des électrons dans le canal.

La figure II.2 présente d'une façon différente la relation courant de drain-tension de grille. Lorsque la tension de grille est très petite par rapport à V_d ($V_d > V_g - V_T$), le courant de drain se situe dans la zone saturée. Puis, une augmentation de la tension de grille fait que le courant de drain devient linéaire ($V_d < V_g - V_T$).

Nous observons une dérive de la linéarité pour une forte tension de grille V_g . Celle-ci proviendrait d'une part de la modification de la mobilité des électrons dans le canal sous l'action d'un champ électrique important à la surface du semi-conducteur et d'autre part, une partie de la tension de drain appliquée ne se retrouve pas totalement aux bornes du canal, mais serait perdue aux bornes des résistances séries de la source et du drain.

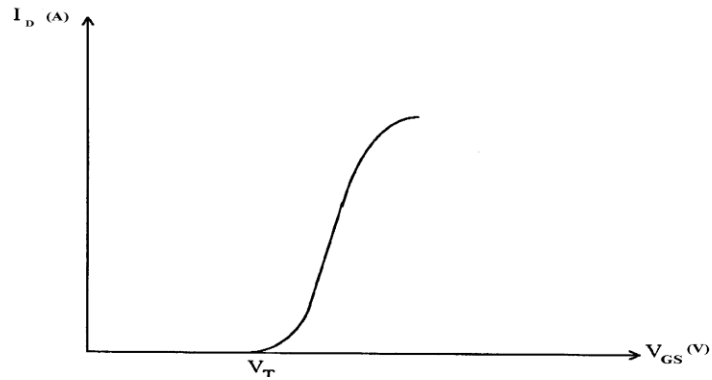


Figure II. 2 : Caractéristique $I_D=f(V_{GS})$ pour $V_{DS}=Cst$ [17]

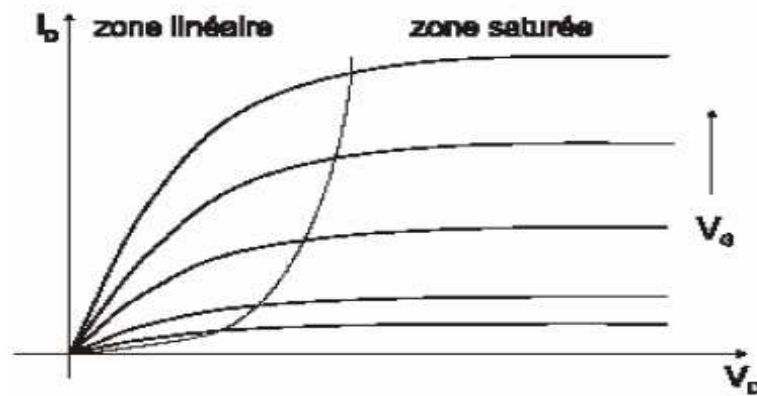


Figure II.3 : Caractéristique $I_D=f(V_{DS})$ pour $V_{GS}=cst$ [17]

Il existe plusieurs paramètres importants du MOSFET, on dénombre :

- La transductance ou le gain (g_m) est définie par :

$$g_m = \frac{dI_D}{dV_{GS}} \quad 2.6$$

Elle doit être la plus élevée possible lorsque la longueur de canal est inférieure à 100nm.

- La conductance du canal (g_D) est donnée par :

$$g_D = \frac{dI_D}{dV_{DS}} \quad 2.7$$

- La pente sous-seuil représente la tension de grille qu'il faut appliquer (en régime sous le sous-seuil dit subthreshold) afin d'augmenter le courant de drain d'une décade elle est donnée par :

$$s = \frac{d(\log I_d)}{dV_{GS}} \quad 2.8$$

- Le courant à l'état<<off>> doit être le plus faible possible pour ne pas consommer de puissance.

II.4.ISFET

En 1970, Piet Bergveld [1] développa un nouveau procédé électronique permettant de mesurer l'activité des ions dans un milieu chimique et biochimique. Il utilisa le principe d'une électrode de verre et d'un transistor à effet de champ. Il mit en évidence la sensibilité aux ions H⁺ d'un transistor MOS (Métal-Oxyde-Semiconducteur) grille métallique. Il introduit ainsi le premier capteur chimique (ChemFET) à effet de champ, l'ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor). La méthodologie de l'ISFET pour la mesure d'ions est développée sur la base du transistor MOSFET (transistor à effet de champ commandé en tension par une grille métallique). Le principe de base du transistor MOSFET est de pouvoir contrôler le courant circulant entre deux zones de semi-conducteur (source et drain) par l'application d'une tension V_{gs} sur la grille.

II.4.1.Définition de L'ISFET

L'ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor) est, en fait, un transistor MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) dont l'électrode de grille est remplacée par une combinaison d'une membrane ou une couche sélective d'ions (pouvant être simplement la surface de l'oxyde de grille) dans une solution analytique et d'une électrode de référence. L'ISE peut être SiO₂, Al₂O₃, Si₃N₄ ou Ta₂O₅ dans le cas de détection des variations de pH.

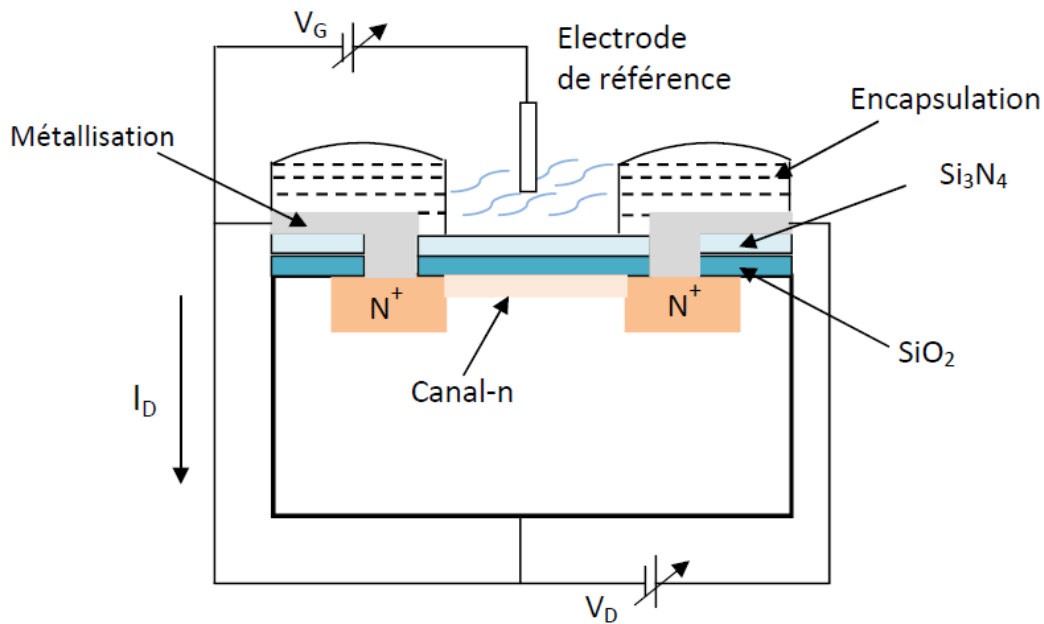


Figure II.4 : Capteur ISFET [15]

II.4.2.Principe de fonctionnement

La méthodologie de l'ISFET pour la mesure d'ions est développée sur la base du transistor MOSFET (transistor à effet de champ commandé en tension par une grille métallique). Le principe de base du transistor MOSFET est de pouvoir contrôler le courant circulant entre deux zones de semi-conducteur (source et drain) par l'application d'une tension V_{gs} sur la grille.

L'électrode de grille métallique est isolée de drain et de la source au moyen d'un oxyde de silicium (SiO₂) et commande le courant drain source (I_{ds}) électro-statiquement.

L'impédance d'entrée, extrêmement élevée de l'électrode de grille implique qu'il n'est pas nécessaire d'appliquer une grande tension d'entrée pour commander ce courant (I_{ds}). Dans ceci la grille métallique est remplacée par une électrode de référence, l'électrolyte à analyser et une grille isolante sensible à la concentration en ion recherché (par exemple H⁺). Le système fondamental de mesure est montré par la figure II.4.

Quand Bergveld [1] présenta pour la première fois le composant ISFET, celui-ci fonctionnait sans électrode de référence. Cependant, des travaux ultérieurs ont indiqué que les opérations propres à l'ISFET demandent la présence d'une électrode de référence pour établir un potentiel dans l'électrolyte en contact avec l'oxyde [17].

II.4.3.Principe physico-chimique de détection

L'équation qui régit la tension de seuil d'un MOSFET est la suivante :

$$V_T = \frac{\phi_M + \phi_{SI}}{q} + \frac{Q_b + Q_{ss} + Q_{ox}}{C_{ox}} + 2\phi_f \quad 2.9$$

Dans le cas de l'ISFET, le même procédé de fabrication est utilisé. Cependant des contributions supplémentaires se manifestent ; en effet l'électrode métallique de grille du MOSFET étant remplacée par une électrode de référence, l'électrolyte et la couche chimiquement sensible.

L'équation de la tension de seuil devient alors [8-13] :

$$V_T = E_{ref} - \Psi_0 + \chi^{sol} - \frac{\phi_{si}}{q} - \frac{Q_{ss} + Q_{ox} + Q_b}{C_{ox}} + 2\phi_f \quad 2.10$$

Le principe de fonctionnement du capteur chimique ISFET est donc basé sur le piégeage d'ions au niveau de la couche sensible. Les charges piégées induisent une variation du potentiel chimique ψ et donc de la tension de seuil du transistor V_T .

II.4.4.Détermination du potentiel chimique ψ

Le principe physico-chimique de détection de l'ISFET est basé sur le cas d'une électrode idéalement bloquante. Dans le cas où aucune charge ne pourrait traverser l'interface électrode-électrolyte, il apparaît à cette interface une région très dense en ions, épaisse de quelques angströms, qui sont le siège de réactions électriques et chimiques. L'accumulation de ces charges modifie le comportement de cette interface qui devient alors analogue à un accumulateur. Plusieurs modèles ont été développés pour rendre compte et expliquer les phénomènes électrostatiques qui ont lieu à l'interface Electrolyte/Isolant/ Solide. Pour expliquer le fonctionnement de cette structure, la théorie du « Site Binding » semble être à l'heure actuelle la seule théorie utilisée [18].

II.4.4.1. Interface Electrolyte/Isolant/Silicium (EIS)

Dans la pratique, la sensibilité au pH mesurée par un ISFET est inférieure à la valeur prédite par la loi de NERNST. Un phénomène chimique propre aux membranes sensibles formées à partir de couche de SiO₂ est responsable de cette dérive. Il n'y a plus d'équilibre thermodynamique entre les ions dans l'isolant et les ions dans l'électrolyte, par conséquent la loi de NERNST n'est plus applicable. La théorie du site-Binding, inspirée des travaux de BOUSSE, explique le procédé qui se produit à l'interface isolant-électrolyte [19].

Ce modèle considère les groupes Si-OH sur la couche d'oxyde comme des centres actifs dont la charge varie proportionnellement aux ions présents à la surface de l'ISFET. Ces centres actifs sont responsables de la formation de la double couche électrique décrite par la théorie de GOUY-CHAPMAN-STERN et donne le potentiel à l'interface oxyde-électrolyte.

Les ions H⁺ et OH⁻, présents dans une solution aqueuse sont appelés « ions déterminants le potentiel ». Ces ions sont responsables de l'état de charge à l'interface SiO₂/électrolyte. Au contact de la solution aqueuse des groupements de silanol (Si-OH) se forment à la surface de l'isolant. Ces groupements peuvent être, suivant le pH de la solution, chargés positivement, chargés négativement ou neutres. Le pH particulier pour lequel la surface de la membrane à zéro charge est appelé « pH au point de charge nulle » pH_{pzc}. La présence de ces groupements de charges amène une correction à l'équation de NERNST habituellement utilisée en électrochimie.

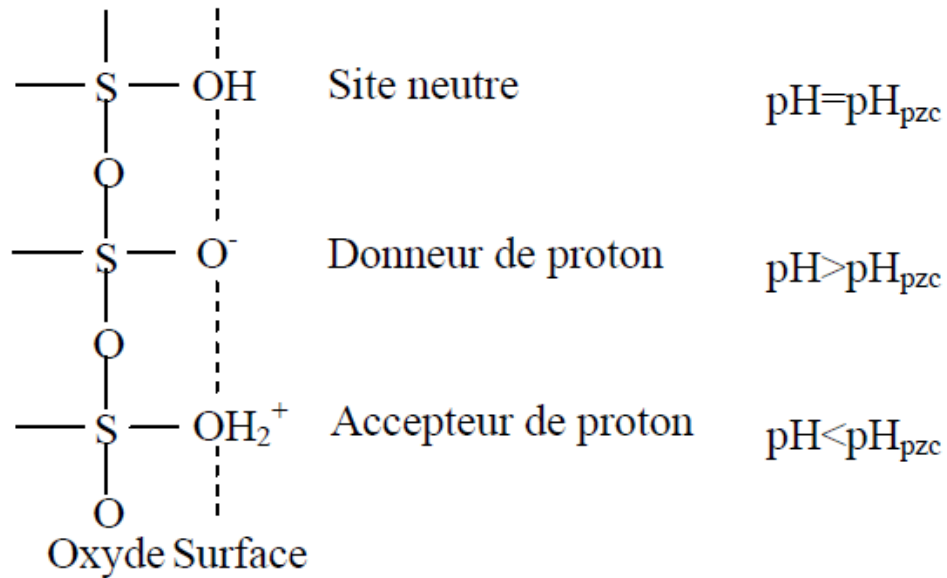


Figure II.5 : Représentation schématique de la théorie du site-Binding [17]

II.4.4.2. La structure Electrolyte-Oxyde- Semi-conducteur

Les structures métal-oxyde-semi-conducteur (MOS) peuvent être caractérisées expérimentalement au moyen de la mesure de leur capacité en fonction de la tension appliquée l'équation d'équilibre des charges dans toute la structure [15]. Il est possible d'étendre la même procédure au cas des structures EOS (Electrolyte-Oxyde- Semi-conducteur).

Dans les structures EOS, la métallisation de grille a été remplacée dans les structures MOS par une solution électrolytique dont il est imposé un potentiel au moyen d'une électrode de référence. Cela introduit par rapport aux structures MOS deux nouvelles interfaces de type liquide-solide.

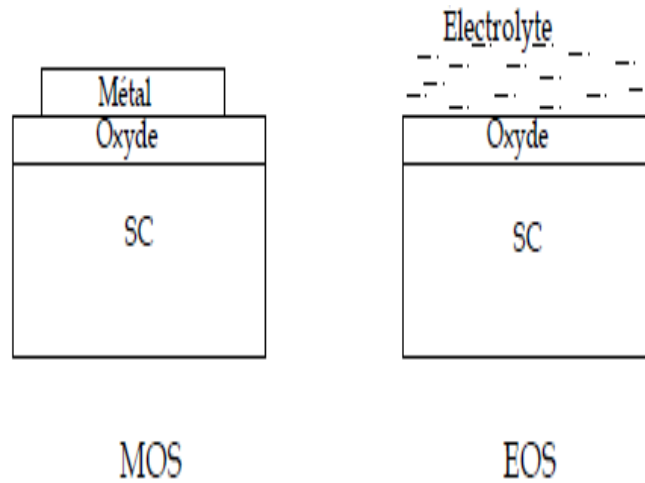


Figure II.6 : schéma simplifié des structures MOS et EOS. [16]

II.4.5. Détection du pH

Le capteur pH-ChemFETs avec la grille SiO_2 possède une sensibilité faible et l'amélioration des propriétés des microcapteurs pH-ChemFETs passe par l'étude et l'amélioration des matériaux de détection et de leur dépôt sur la grille SiO_2 . De nombreuses membranes sensibles aux ions hydrogène (généralement ce sont des matériaux non-organiques) ont été élaborées afin d'améliorer la sensibilité, la sélectivité, la stabilité et la durée de vie. Notons les principales membranes sensibles aux ions hydrogène et leurs caractéristiques [15] :

- Le nitrure de silicium (Si_3N_4). Le capteur pH-ChemFET avec la grille diélectrique $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ est caractérisé par un court temps de réponse, un faible courant de fuite. Ce matériau qui est bien connu et maîtrisé dans la technologie des circuits intégrés (IC) a été parmi les premiers impliqués dans les capteurs chimiques [13]. Généralement, cet isolant est obtenu par dépôt chimique en phase vapeur à basse pression (LPCVD) ;
- L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). La sensibilité de cette membrane est autour de 53 -56 mV/pH, cependant les capteurs pH-ChemFETs avec la couche $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ possèdent une importante dérive temporelle. La couche sensible est habituellement obtenue par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) ;

- L'oxyde de tantale (Ta_2O_5). Cette couche diélectrique est prometteuse pour la détection des ions hydrogène. Elle possède une bonne sensibilité de 58 – 59 mV/pH et une petite dérive temporelle de 0,03 – 0,05 pH/jour. Les membranes de Ta_2O_5 ne sont pas sélectives aux ions potassium K^+ , calcium Ca^{+2} et sodium Na^+ . Ce matériau est déposé soit par pulvérisation radiofréquence RF, soit par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD) ;

caractéristiques	SiO ₂	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	Ta ₂ O ₅
Intervalle de ph	4-10	1-13	1-13	0-8	2.5-13
Sensibilité [mv/ph]	25-46	46-56	53-56	50-56	55-57
Temps de réponse [95%]	<1min	<1s	<1s	>1min	<1s
Stabilité [mv/h.ph]	Instable	1.0	0.8	0.2	0.5

Le tableau II-2 donne un sommaire des couches ionosensibles utilisées dans le capteur ISFET [13].

II.4.6.Méthode de mesure

Le principe de mesure est le suivant : la valeur du courant de drain (I_{ds}) est maintenue constante à une valeur I_0 au moyen d'un asservissement électronique. Si la valeur du pH de la solution change, la tension de seuil de l'ISFET (V_T) change ainsi que le courant de drain. La rétroaction électronique rajuste la tension fixée par l'électrode de référence de telle manière que le courant de drain soit maintenu constant à la valeur I_0 . L'écart entre la nouvelle tension de grille (V_{pH2}) et l'ancienne (V_{pH1}) est proportionnel à la variation de pH (figure II-8).

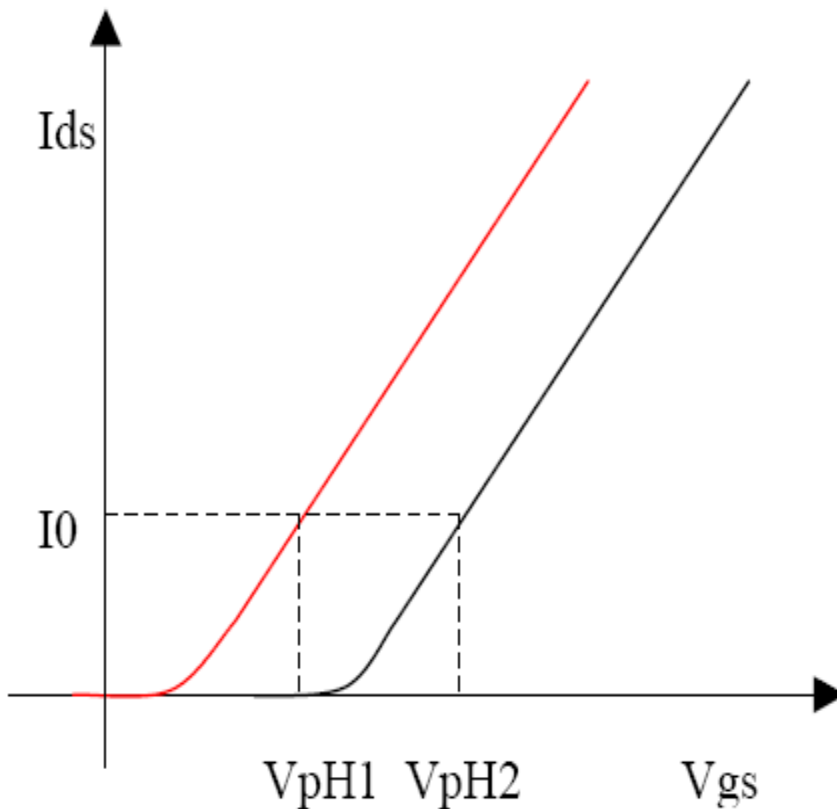


Figure II.7 : Réponse au pH d'un capteur ISFET. Variation de la tension de seuil pour des mesures $I_{ds}(V_{gs})$ effectuées dans deux solutions différentes [17].

II.4.7. Les inconvénients et les avantages d'un ISFET

Le tableau I.3 regroupe les avantages et les inconvénients des capteurs chimiques ISFETs [12].

Avantage	Inconvénients
Compatibilités avec la technologie silicium	Dérive temporelle
Faible cout	Vieillessement
Possibilité de conception des capteurs jetables	Sensible à la force ionique de la solution
Miniaturisation	Calibration fréquente
Intégration dans les systèmes monolithiques	Optimisation de packaging
Robustesse	Difficulté d'intégration des couches sensibles
Facilité et commodité d'utilisation	Intégration d'une électrode de référence
Faible résistance de sortie	
Caractère générique : adaptation a tous type d'ions dans le cadre de système multi capteurs	
Court temps de réponse	
Faible énergie de consommation	
Interface avec la micro fluidique	
Non nécessite du maintien spéciale	

Tableau II.3 : Avantages/Inconvénients des capteurs chimiques ISFETS

II.5.Conclusion

Ce chapitre a été consacré à un état de l'art sur les capteurs chimiques de type ISFET.

En premier lieu nous avons commencé par un aperçu sur l'électrode à ions spécifiques, en seconde lieu une synthèse bibliographique sur principe de fonctionnement des ISFETs a été détaillée par le développement des formules, cette étude est basée sur les deux théories principales (Nernst et Site-Binding).pour mettre en évidence l'amélioration de la sensibilité de ces capteurs .pour terminer nous avons jugé utile de récapituler les avantages et inconvénients des capteurs chimiques de type ISFET.

Chapitre 3
Modélisation et simulation
de l'ISFET

III.1.INTRODUCTION

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons décrit la Modélisation d'ISFETs fournit des outils importants pour la prévision de la fonction de l'appareil pour de nouveaux matériaux différents de détection qui peuvent être utilisées pour fabriquer des dispositifs ayant une sensibilité améliorée. L'objectif de base de la modélisation ISFET est d'obtenir une relation de la forme $\Psi_0 = f(\text{pH})$ et presque tous les modèles ont examiné l'état de charge de la neutralité d'un électrolyte-isolant-semi-conducteur de système (EIS) [20] en collaboration avec la théorie de Site-Binding. L'objectif de cette section est de décrire certaines quantités mathématiques utilisés pour de nombreux modèles ISFET.

Dans la deuxième partie de ce chapitre on décrit la simulation de pH-ISFET.

Partie1 : Modélisation

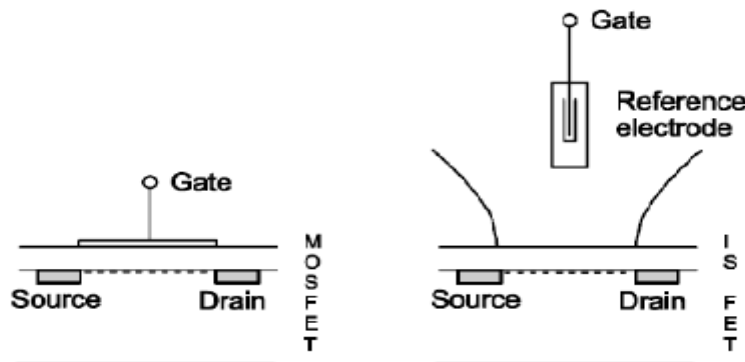


Fig. III.1. Schéma de transistor MOSFET et ISFET.

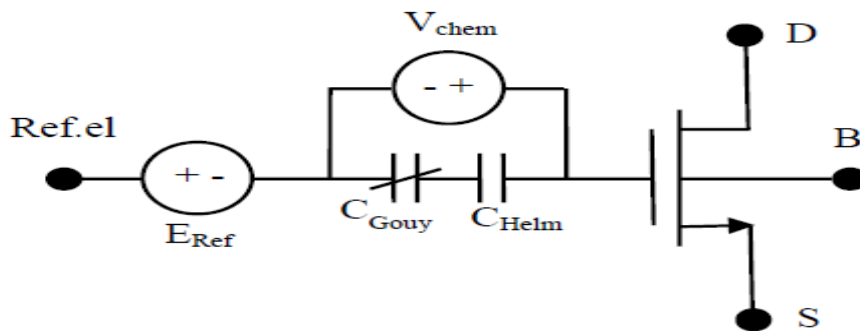


Fig. III.2. Le modèle d'équivalent d'ISFET

$$V_{th}(ISFET) = V_{th-chem} + V_{th-mos} \quad 3.1$$

Avec :

$$V_{th-chem} = E_{ref} - \Psi_0 + \Delta\varphi^{lj} + \chi^{sol} \quad 3.2$$

$$V_{th-mos} = \frac{-\phi_{SI}}{q} - \frac{Q_b + Q_{SS} + Q_{ox}}{C_{ox}} + 2\phi_F \quad 3.3$$

La somme des deux tensions de seuil peut s'exprimée comme suit :

$$V_{th}(ISFET) = E_{ref} - \Psi_0 + \chi^{sol} + \Delta\varphi^{lj} + \frac{-\phi_{SI}}{q} - \frac{Q_b + Q_{SS} + Q_{ox}}{C_{ox}} + 2\phi_F \quad 3.4$$

Là où $V_{th-chem}$ représente la tension de seuil chimique de l'ISFET. E_{ref} est le potentiel d'électrode de référence. $\Delta\varphi^{lj}$ est la chute de potentiel entre electrode de référence et la solution, qui a une valeur typique de 3 mV et peut être négligée. Ψ_0 est un paramètre d'entrée qui est une fonction chimique de la solution du pH, tandis que χ^{sol} , potentiel de surface du solvant, Q_{SS} est la densité de charge d'état de surface fixé par unité de surface à l'interface isolant-Semiconducteur, Q_{ox} présente la charge fixe dans l'isolant, Q_b est la charge de la couche de déplétion, C_{ox} est la capacité de l'isolant de grille par unité de Surface. ϕ_F est la différence de potentiel entre le niveau de Fermi E_F du silicium dopé et son niveau intrinsèque E_i , ϕ_{SI} représente le travail de sortie du métal et du semi-conducteur.

Si nous procédons comme le transistor MOSFET puis l'expression générale pour le courant de drain de l'ISFET dans le mode linéaire et le mode saturé peut être directement écrite comme suit :

$$I_{ds} = \frac{\mu c_{ox} W}{2L} (V_{gs} - V_{th}(ISFET))^2 \quad 3.5$$

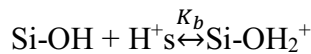
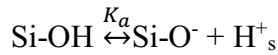
$$I_{ds} = \frac{\mu c_{ox} W}{2L} \left[(V_{gs} - V_{th}(ISFET)) V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2} \right] \quad 3.6$$

et μ , W , et L sont la mobilité des électrons, la largeur de canal, et la longueur, respectivement.

L'ISFET peut être représenté par un modèle tel que figure III.2.

Elle se compose d'une partie de produit chimique et d'un transistor MOS. Dans la partie chimique, deux capacités en série C_{Helm} et C_{Gouy} représentent Gouy-Chapman et Helmholtz capacité équivalente, Deux sources de tension E_{ref} et V_{chem} sont connectées en série pour désigner les composantes de la tension de seuil chimique de l'ISFET en (III.4). V_{chem} se compose de deux potentiels, $-\Psi_0 + \chi^{\text{sol}}$, dans ce qui χ^{sol} est une constante à l'égard de la valeur du pH, et Ψ_0 est le seul paramètre chimique qui est responsable de la sensibilité ISFET.

En considérons la théorie de site-binding dénotons l'emplacement extérieur de SiOH_2^+ , SiOH , SiO^- positifs, neutres, négatifs de la surface isolante. L'échange des ions de détermination de potentiel avec ces emplacements peut être décrit comme suit :



Dans la condition d'équilibre, les constantes amphotères de dissociation sont données par :

$$K_a = [\text{Si-O}^-] * [\text{H}^+_s] / [\text{Si-OH}] \quad 3.7$$

$$K_b = [\text{Si-OH}_2^+] / [\text{Si-OH}] * [\text{H}^+_s] \quad 3.8$$

L'indice s dans $[\text{H}^+]$ signifie que la concentration des protons est près de la surface de l'isolateur, $[\text{Si-OH}]$, $[\text{Si-OH}_2^+]$ et $[\text{Si-O}^-]$ sont des concentrations de proton actuels dans la surface d'oxyde.

La distribution des ions hydrogène dans l'électrolyte peut être décrite par la statistique de Boltzmann.

$$[\text{H}^+_s] = [\text{H}^+] e^{(-q \Psi_0 / kT)} \quad 3.9$$

La théorie du site binding permet ainsi de montrer que :

$$[\text{H}^+_s] = (k_a / k_b)^{1/2} e^{(-q \Psi_0 / kT)} F(\Psi_0) \quad 3.10$$

En prenant le logarithme de l'équation précédente, on aboutit à :

$$-\text{pH} = \log(k_a / k_b)^{1/2} + q \Psi_0 / kT (\ln 10) + \log(F(\Psi_0)) \quad 3.11$$

Ainsi, en isolant le potentiel Ψ_0 , on obtient :

$$\Psi + G(\Psi_0) = (\ln 10) kT / q + (\text{pH}_{\text{pzc}} - \text{pH}) \quad 3.12$$

$$\text{Avec } \text{pH}_{\text{pzc}} = -1/2 \log(k_a / k_b) \quad 3.13$$

L'étude complète permet également de montrer que [22] :

$$G(\Psi_0) = \text{argSh}\left(\frac{q\Psi_0}{\beta kT}\right) \quad 3.14$$

$$\text{Avec : } \beta = \frac{2N_s q^2}{\left(\frac{K_a}{K_b}\right)^2 C_D K_b T} \quad 3.15$$

Ce terme β va rendre compte de la sensibilité finale. Il est fonction de l'équilibre acide base relatif aux réactions de surface, du nombre total de sites amphotères à la surface de l'isolant NS et de la capacité de la double couche C_D .

Lorsque $\beta \gg KT/q\Psi_0$, on a :

$$G(\Psi_0) = \left(\frac{q\Psi_0}{\beta KT}\right) \quad 3.16$$

L'équation 12 deviendra alors :

$$\Psi_0 = \frac{KT}{q} \ln 10 \frac{\beta}{\beta+1} (\text{pHpzc} - \text{pH}) \quad 3.17$$

Ainsi, la sensibilité de l'ISFET sera définie par :

$$S = \left| \frac{d\Psi_0}{d\text{pH}} \right| = \frac{KT}{q} \ln 10 \frac{\beta}{\beta+1} \quad 3.18$$

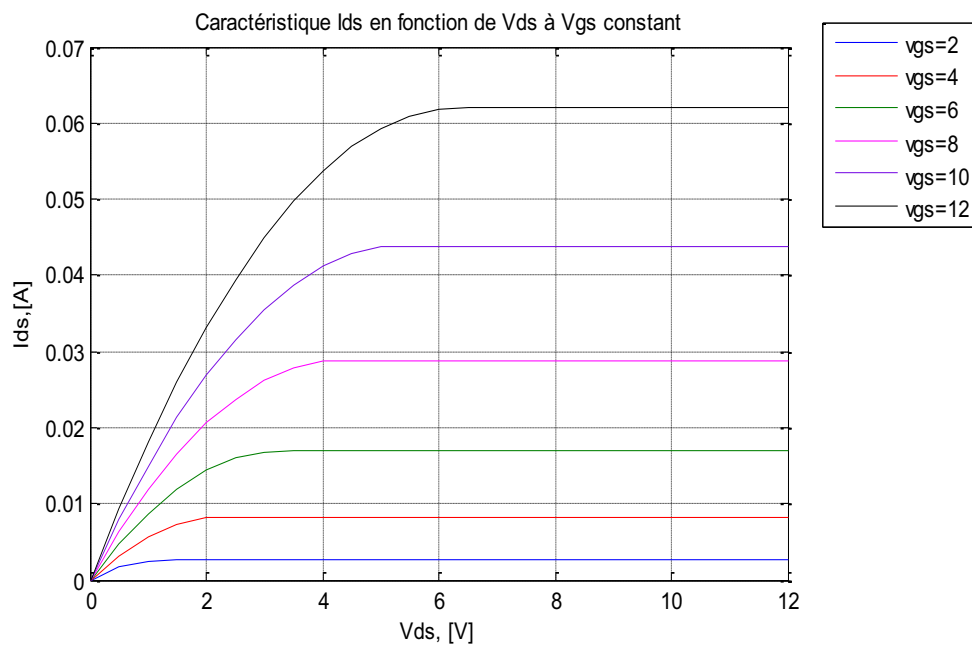
Pour un bon nitrure ($\beta \gg 1$), à $T = 300\text{K}$, la sensibilité est Nernstienne ($S \approx 59 \text{ mV/pH}$)

Partie 2 : SIMULATION

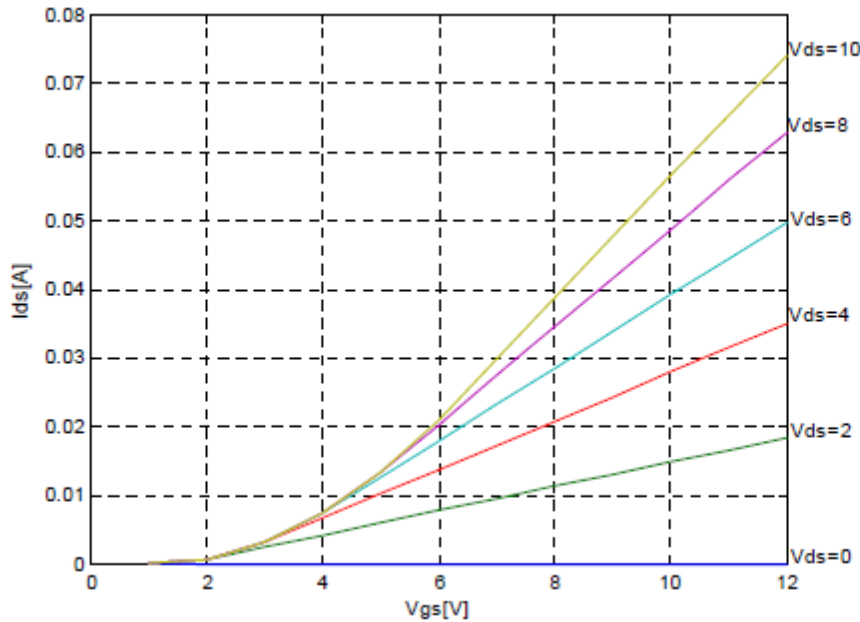
III.1. Caractéristiques électriques de L'ISFET

Tout d'abord, pour vérifier le fonctionnement électrique du capteur ChemFET, nous avons tracé une famille des courbes caractéristiques dans la solution neutre $\text{pH} = 7$ (figure III.3).

Ces caractéristiques du ChemFET sont similaires à celles d'un MOS et elles sont en accord avec les équations électriques d'un transistor à effet de champ. Ceci prouve que le capteur ChemFET est opérationnel. La longueur de ce capteur pH-ISFET est de $30\mu\text{m}$. La tension de seuil V_t est autour de $0,7\text{ V}$ et le courant de fuite $I_{\text{Fuite}} \approx 5\ \mu\text{A}$.



(a)



(b)

Figure III.3. : Caractéristique I_{ds} en fonction de V_{ds} à V_{gs} constant ($L = 30 \mu\text{m}$)

à $\text{pH} = 7$ où $V_T = 0,7 \text{ V}$

- a) I_{ds} (V_{ds}) à $V_{gs} = \text{const.}$
- b) I_{ds} (V_{gs}) à $V_{ds} = \text{const.}$

Les courbes $I_{ds}(V_{gs})$ permettent entre autre de définir simplement la frontière entre mode saturé et mode linéaire caractérisée par la relation : $V_{ds} = V_{gs} - V_T$ (figure III.3b).

Ces critères seront par la suite utilisés afin de définir le point de polarisation (I_{ds} , V_{ds}) optimal du capteur pH -ChemFET tout en prenant en compte la variation de la tension de seuil V_T sur la gamme de pH considérée.

III.2.Détection du pH

La caractéristique de transfert I_{ds} en fonction de V_{gs} à V_{ds} constante fait apparaître la liaison entre la tension grille-source V_{gs} et le pH de la solution, pour mesurer l'activité des ions, on utilise soit le régime linéaire de fonctionnement de l'ISFET, soit le régime de saturation du fait que la sensibilité au pH ne dépend pas significativement du courant I_{ds} traversant le capteur.

Afin d'estimer la sensibilité du capteur à l'ion H⁺, nous avons effectué une analyse dans trois solutions tampons avec des pH = [2, 7, 9], à température ambiante. Les caractéristiques que nous avons tracées sont des courbes I_{ds} (V_{gs}). La détermination de cette sensibilité se fait pour des valeurs fixes du courant I_{ds} et de la tension V_{ds}. La valeur de la tension V_{gs} qui en résulte donne alors la mesure du pH. Cette valeur est ensuite reportée sur un graphe en fonction du pH.

La sensibilité est donnée par l'équation (III.18), représentant la pente de la courbe donnant V_{gs} en fonction du pH.

$$S = \left| \frac{d\psi_0}{dpH} \right| = \frac{KT}{q} \ln 10 \frac{\beta}{\beta+1} \quad \text{III.19}$$

Pour les paramètres de notre modèle, la sensibilité est quasi Nernstienne S=54.7mV/PH

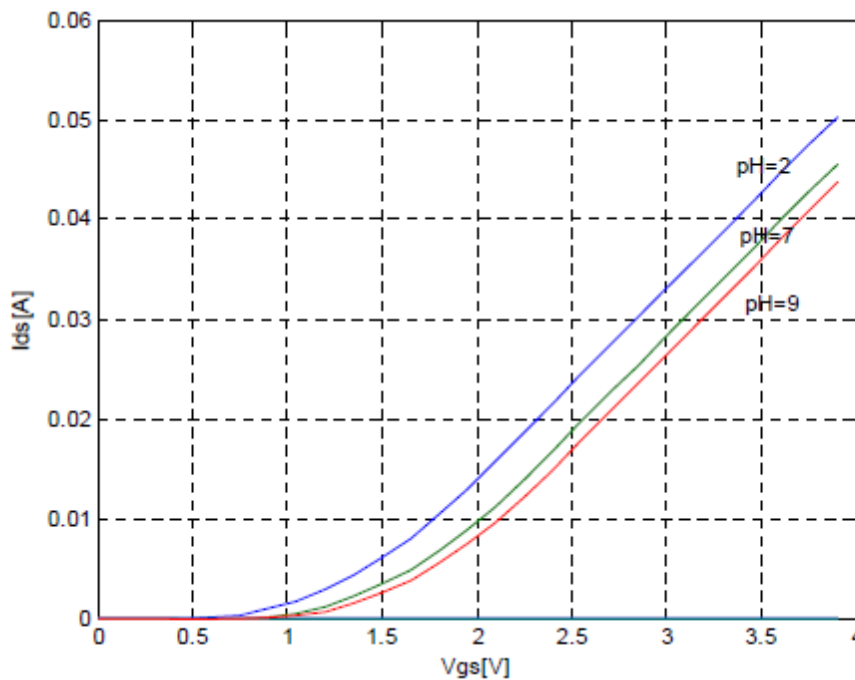


Figure III.4 : Réponse d'un ISFET dans trois solutions tampon de pH (I_{DS} de V_{GS} à V_{DS}=1.5V)

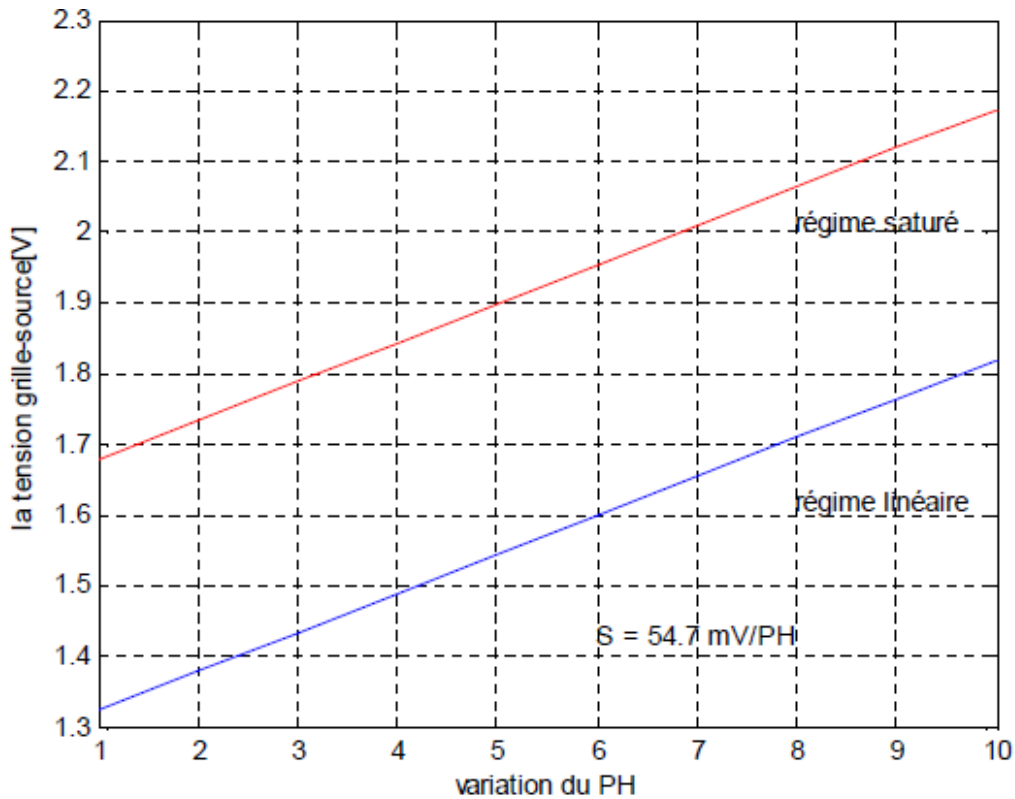


Figure III.5 : La sensibilité du capteur ISFET

III.3. Interprétation

Nous observons d'abord l'accroissement du potentiel avec l'augmentation des valeurs du pH. La réponse du capteur pH-ISFET à la variation du pH est expliquée en utilisant le modèle du « site binding » qui décrit le mécanisme des charges d'un oxyde à l'équilibre entre les groupements OH (par exemple le silanol Si-OH) de surface et les ions H⁺ de la solution, couplé avec le modèle de Gouy-Chapman-Stern du potentiel de surface dans l'électrolyte, (décrit au Chapitre II)

En effet, les groupements OH existant à la surface de l'oxyde agissent comme des sites amphotères lorsque ils sont en contact avec un électrolyte. C'est-à-dire qu'ils peuvent être neutres, donneur de protons, ou accepteur de protons.

Dans la solution de pH=2, les sites récepteurs de la surface attachent les ions H₃O⁺ à cause de leurs concentrations élevée dans la solution (acide fort), à l'équilibre thermodynamique l'interface oxyde/ électrolyte est donné par l'équation suivante :



+

La différence entre la concentration des ions H^+ dans l'électrolyte et en surface crée un potentiel Ψ_0 , qui atteint sa valeur maximale à l'interface $\Psi_{0max} = 0.36V$. Si le pH augmente, et reste inférieur à 7 (acide faible), la concentration des ions H^+ diminue dans l'électrolyte et reste maximal à l'interface, en effet la diminution de la concentration des ions H^+ dans l'électrolyte avec l'augmentation du pH, induit une augmentation du potentiel.

Pour le cas d'une solution neutre (pH=7), les ions H_3O^+ et OH^- sont accumulés à la surface de la couche sensible, la diminution de la concentration des H^+ conduit à une augmentation du potentiel, qui prend sa valeur maximale à l'interface $\psi_{0max} = 0.66V$.

Dans la solution 3 de pH = 9 (une base), les sites amphotères de la surface attachent les ions OH^- parce que leur concentration est supérieure à celle des ions H_3O^+ , la réaction chimique à l'interface devient :



La concentration des ions H^+ dans la solution est faible et est forte à l'interface ($K_a = 15.8$), donc la différence de potentiel entre la surface et l'électrolyte devient importante et le potentiel ψ_0 augmente, dans ce cas $\psi_0 = 0.78V$. Si on augmente encore le pH (base forte), le potentiel ψ_0 prend des valeurs maximales.

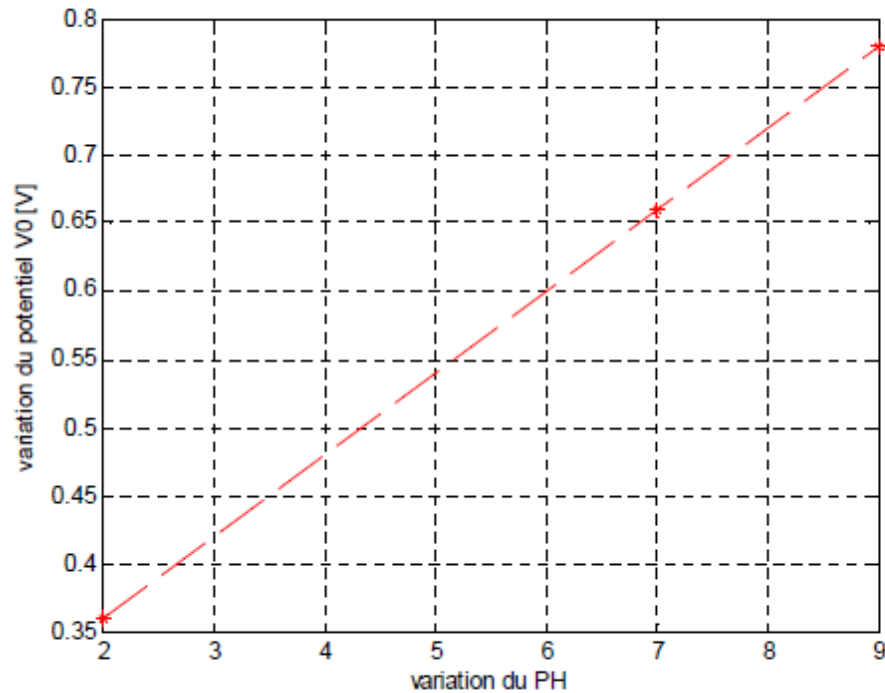


Figure III.6 : Variation du potentiel ψ_0 en fonction du pH de la solution

Finalement, nous avons prouvé que le potentiel ψ_0 dépend de l'acidité du milieu et varie linéairement avec le pH, cette variation provoque un décalage de la tension de seuil du capteur ISFET suivant l'équation III.4.

Tous les paramètres de l'équation (III.4) peuvent être fixés à l'exception du potentiel ψ_0 lié à l'acidité de la solution à analyser.

Sachant que V_{gs} est donnée par :

$$V_{gs} = V_T + \frac{I_{ds}}{KV_{ds}} + \frac{V_{ds}}{2} \quad 3.22$$

La tension V_{gs} varie linéairement avec la tension de seuil V_T et donc avec les variations de pH, la détermination de la sensibilité des capteurs se fait aux valeurs fixes du courant I_{ds} et de tension drain-source V_{ds} . La variation de la tension grille-source V_{gs} est reliée dans ce cas uniquement à la variation de V_T dépendant de la variation du pH.

III.4. Implantation de la membrane Si₃N₄

Dans le modèle que nous avons proposé il existe beaucoup de paramètres qui peuvent influencer sur la réponse du capteur et de ce fait sur sa sensibilité en commençant par la géométrie du dispositif la longueur du canal en particulier, les niveaux de dopage ainsi que les matériaux semi-conducteurs et les isolants utilisés.

Le choix de l'isolant et de la membrane ionosensible a attiré particulièrement notre attention. Effectivement de nombreuses membranes sensibles aux ions hydrogène (généralement ce sont des matériaux non-organiques) ont été élaborées afin d'améliorer la sensibilité, la sélectivité, la stabilité et la durée de vie. Notons les principales le nitrure de silicium (Si₃N₄) sensibles aux ions hydrogène et ses caractéristiques : court temps de réponse, un faible courant de fuite due à sa constante diélectrique deux fois supérieur à celle du SiO₂, et une sensibilité quasi-Nernstienne (autour de 50 - 56 mV/pH) cela est due principalement au nombre de sites amphotères N_s en surface de l'isolant Si₃N₄.

Ces sites sont responsables des réactions chimiques entre les ions et la membrane. En effet cette variation provoque une variation du coefficient de sensibilité β selon l'équation suivante :

$$\beta = \frac{2N_s q^2}{\left(\frac{K_a}{K_b}\right)^2 C_D K_b T} \quad 3.23$$

Nous avons pu améliorer notre modèle en introduisant ce paramètre nous avons pu ainsi simuler l'activité des ions H⁺ près de la surface de l'électrolyte en contact avec la membrane.

D'après une recherche sur le site amphotère réalisé par Bartic et al [17], le nitrure de silicium Si₃N₄ a un nombre de site amphotère 1,5 fois plus grand que celui de l'oxyde de silicium SiO₂.

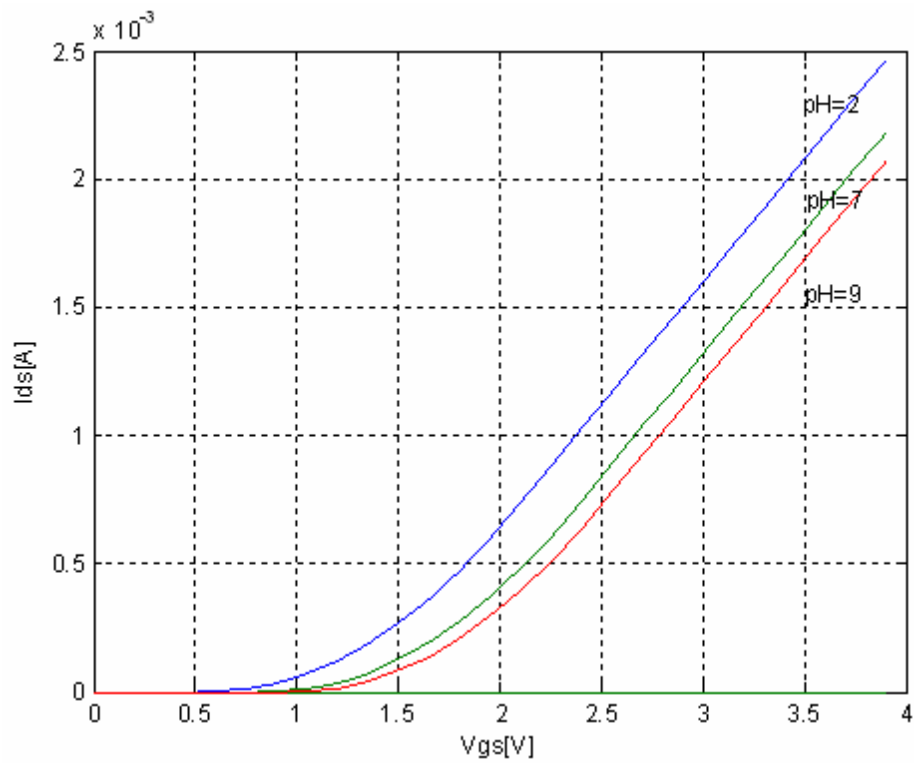


Figure III.7. : Réponse d'un ISFET dans trois solution tampon de pH (I_{DS} de V_{GS} à $V_{DS}=1.5V$)

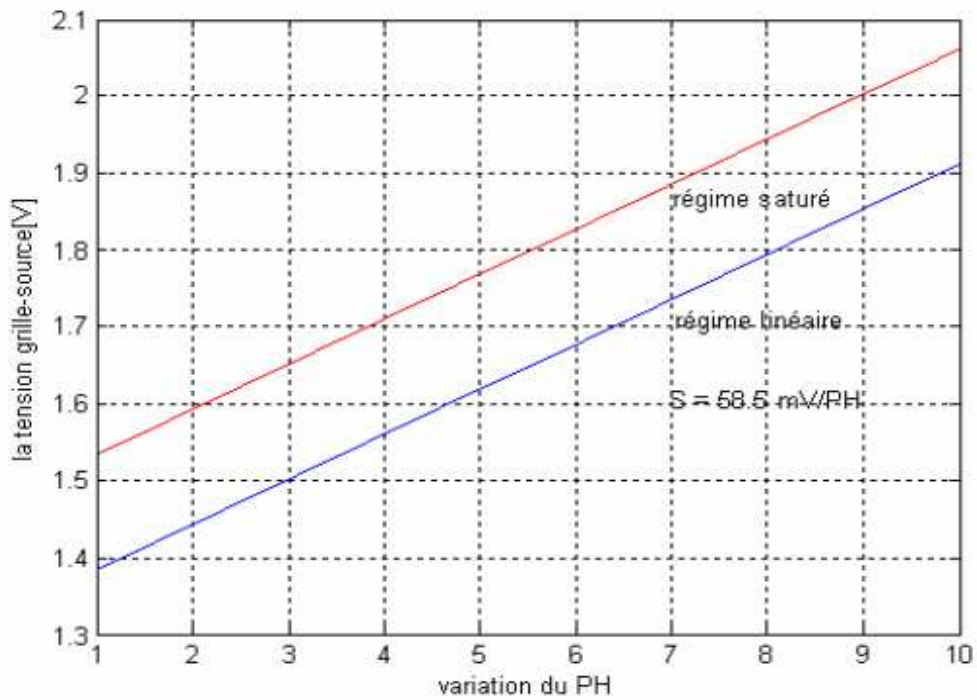


Figure III.8 : La sensibilité du capteur ISFET avec une membrane de Si_3N_4

Pour la membrane de nitrure de silicium, la sensibilité est quasi Nernstienne = 58.5 mV/pH, et est la même pour les deux régimes de polarisation. L'intégration du coefficient β nous a permis d'avoir une sensibilité du capteur un peu plus grande que celle retrouvée expérimentalement pour les membranes Si_3N_4 mais néanmoins plus approchante.

III.2.CONCLUSION

Nous avons présenté à travers ce chapitre, la modélisation d'un capteur ISFET par la méthode des éléments finis. Ceci a nécessité d'une part la modélisation numérique du transistor MOSFET et d'autre part la modélisation numérique de l'électrolyte. Un intérêt particulier a été consacré à l'étude de la sensibilité du capteur en fonction de la membrane ionosensible utilisée.

En effet, les résultats ont montré une meilleure sensibilité du capteur à base d'une membrane en Si_3N_4 , que celle obtenue par utilisation d'une membrane en SiO_2 .

Conclusion générale

Conclusion générale

L'évolution de la nouvelle génération de microcapteurs basés sur la technique standard de la microélectronique complétée par le micro usinage de silicium a conduit à une intégration du capteur en vue d'augmenter les performances et la portabilité.

Nous avons étudié d'un aspect technologique microcapteur ISFET. Une fois le principe fondamental nous avons étudié les équations fondamentales qui le régissent et cet en vue de modélisation et simulation.

A travers notre étude, la technologie de fabrication du capteur pH-ISFET repose sur un transistor MOS à grille diélectrique (sans grille métallique). L'oxyde de silicium SiO_2 et le nitrure de silicium Si_3N_4 constituent l'isolant de cette structure mais peuvent toute aussi bien jouer le rôle de la couche ionosensible. La présence d'ions dans la couche d'isolant crée un potentiel dans cette région qui se traduit par un décalage de la tension de seuil du dispositif. Ce décalage de la tension de seuil du transistor pH-ISFET traduit la variation du pH de la solution à analyser.

L'étude de l'impact du choix de la membrane sur les caractéristiques électriques du capteur et surtout sur la sensibilité de L'ISFET nous a permis de choisir un modèle qui décrit l'influence de la membrane. Les résultats ont montré une meilleure sensibilité du capteur à base d'une membrane en Si_3N_4 et ce, en comparaison a la sensibilité obtenue par utilisation d'une membrane en SiO_2 .

En perspective, nous optons à la mise au point d'un banc de mesure, pour la caractéristiques du capteur étudié. Ceci nous permettra de mieux cerner les paramètres contrôlant la sensibilité du capteur.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Mohamed Mehdi JATLAOUI, « Capteurs Passifs à Transduction Electromagnétique Pour la Mesure Sans Fil de La Pression » thèse de doctorant de l'université de Toulouse ,20 avril 2009.
- [2] O. Français, T. Bourouina « Les microsystèmes : Introduction » Ecole nationale supérieure Electronique, Informatique et Radiocommunication, Université de Bordeaux.
- [3] P. Bergveld. « Development of an Ion-Sensitive solid-state device for Neurophysiological Measurements», IEEE Trans Biomed Eng., 1970 Pages 70-71.
- [4] : Yacine Younes «Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs» Mémoire de magister, UMMTO, 26/09/2012.
- [5] : E. Duffour-Gergam « Présentation des Micro-technologies et Microsystèmes » Institut d'Electronique Fondamentale, Université de Paris 11.
- [6] : G. Asch. « Les capteurs en instrumentation industrielle», Dunod/Bordas, Paris, 1982.
- [7] : Philippe Meyne «Généralités sur les capteurs», Université paris 12, 2008/09.
- [8] : Alain Foucaran « Cours Capteurs Et Microsystèmes» Université Montpellier II.
- [9] : O. Français, T. Bourouina « Les microsystèmes : Introduction » Ecole nationale supérieure Electronique, Informatique et Radiocommunication, Université de Bordeaux.
- [10]Tahanout .C, « Etude, Simulation Electronique d'un micro capteur de gaz à base d'oxyde semi-conducteur». Thèse de magister, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, 2010.
- [11] Zein.J. «Outils CAO pour microsystèmes», thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 2003.
- [12] I. Humenyuk. « Développement des microcapteurs chimiques ChemFETs pour l'analyse de l'eau », Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2005
- [13] Nilsson H., Akerlund A.C., and Mosbach K., «Determination of glucose urea and penicillin using enzyme-pH electrode» Biochim. Biophysics. Act 320 (1973)
- [14] M. Yuqing, G. Jianguo, and C. Jianrong, «Ion sensitive Field Effect transducer based biosensors, » Biotechnology Advances, 2003.
- [15]Bogdan Mihail CRETU, «Performances et fiabilité des Transistors MOS sub 0.1 μm » Thèse de Doctorat de L'INPG, Janvier 2003
- [16] H. Mathieu, « Physique des semiconducteurs et des composants électroniques », Masson (1987) 363.

[17]B. Torbiero, « Développement de microcapteurs électrochimiques pour l'analyse en Phase liquide », thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2006.

[18] L.Bousse, «Operation of Chemically Sensitive Field-Effect Sensor as a function of the Insulator-Electrolyte Interface», 1983

[19]Ali Amari « Etude de la réponse au pH de structures microelectroniques a membranes de nitrure de silicium fabriqué par LPCVD», Thèse de doctorat de Toulouse, 1984.

[20]J.C.Dutta. «Modeling ion sensitive Field Effect transistors for biosensor applications», article 2010.