

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de fin d'étude
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**
Filière : **Electronique**
Spécialité : **Instrumentation**

**Etude et modélisation d'un capteur de pH à base de
transistor à effet de champ**

Présenté par :

- DJAFER Amdjed
- ABBASSI Djouhaina

Sous la direction de :

Dr. Tamersit Khalil

Septembre 2020

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 8Mai 1945 – Guelma

Faculté des sciences et de la Technologie

Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de fin d'étude
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**

Filière : **Electronique**

Spécialité : **Instrumentation**

**Etude et modélisation d'un capteur de pH à base de
transistor à effet de champ**

Présenté par :

- DJAFER Amdjed
- ABBASSI Djouhaina

Sous la direction de :

Dr. Tamersit Khalil

Septembre 2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail de fin d'étude À **MES CHERS PARENTS** Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Que dieux vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.*

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères pour leur appui et leur encouragement,

A ma très chère tante et mes belles sœurs pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

A mes très chères nièces, et mon petit neveu.

A mes chères amies pour leur aide et support dans les moments difficiles.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.

Djoughaina

A mes chères parents Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices.

A mes chères et adorables frère et sœur que j'aime profondément. de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

A la mémoire de mon grand père J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde

A mes amis de toujours: En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

A toutes les personnes qui ont participé a l'élaboration de ce travail à tous ceux que j'ai omis de citer

Amdjed

Remerciements

En tout premier lieu, nous remercions le bon dieu pour tout.

Nous remercions *Allah* qui nous a tout donné pour atteindre ce stade.

Nous remercions vivement les membres de jury pour leur disponibilité et l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à notre travail.

Nous remercions énormément notre encadrant, le Docteur Khalil Tamersit, qui a rendu tout le travail possible.

Finalement, Nous remercions nos amis, nos collègues et toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

- DJAFER Amdjed

- ABBASSI Djouhaina

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre 1. Généralités : Température et thermométrie	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Notion de PH.....	5
I.3. Le PH à température ambiante.....	6
I.3.1. Mesure de PH.....	6
I.3.1.1. Indicateur coloré.....	6
I.3.1.2. Mesure au papier de PH.....	6
I.3.1.3. Echelle de PH.....	7
I.3.1.4. Mesure aux PH-mètre.....	7
I.4. Développement de la mesure de PH.....	9
I.5. Les transistors à effet de champs	9
I.5.1. Le transistor MOSFET	10
I.5.2. Principe de base d'un MOSFET	10
I.5.3. Principe de fonctionnement.....	11
I.5.4. Architecture générale du transistor MOSFET	12
I.6. Les capteurs ISFET	13
I.6.1 Introduction.....	13
I.6.2 Description analytique	14
I.6.3 Principe de fonctionnement	15
I.6.3.1 La double couche électrochimique	15
I.6.3.2 Métaux sensibles aux ions hydrogène	17
I.7. Conclusion	17
Chapitre 2. Modélisation analytique d'un capteur chimique à base de GFET	
II.1. Introduction	19
II.2. Variétés allotropiques du carbone	20
II.3. Le graphène.....	20
II.4. Hybridation des orbitales.....	22
II.5. Le FET et le GFET.....	24
II.5.1. Description du dispositif.....	24
II.5.2. Caractéristiques I-V.....	25
II.5.3. Fonctionnement en mode capteur de PH.....	25

II.5.4. Circuit capacitif et modélisation	26
II.5.4.1. Courant du drain.....	27
II.5.4.2. effet de la capacité équivalente	29
II.6. Conclusion.....	31
Chapitre 3. Modélisation analytique d'un capteur de PH à base de GFET	
III.1. Introduction.....	33
III.2.description du dispositif	34
III.3. Modèle de liaison de site et couche de Stern	34
III.4. Potentiel de la solution électrolytique.....	35
III.5. Résultats et discussions.....	36
III.6. Instrumentation	39
III.7. Conclusion.....	40
Conclusion générale	41
Bibliographies	42
Résumé	

Liste des figures

- Figure I.1 Échelle du pH à 25°C..... 7
- Figure I.2 Schéma de principe d'un ph mètre..... 7
- Figure I.3 Circuit électronique d'un PH-mètre..... **8**
- Figure I.4 Canal vide: courant nul. 11
- Figure I.5 Canal rempli: courant non nul. 11
- Figure I.6 structures et symboles des transistors MOSFET. 12
- Figure I.7 (a) Schéma de principe d'un MOSFET conventionnel et définition des termes. (b) Représentation de la vue en trois dimensions du MOSFET. 12
- Figure I.8 Schéma d'un capteur ISFET. 13
- Figure I.9 Schéma de la structure EOS. 14
- Figure I.10 représentation schématique de double couche électrique à l'interface solide électrolyte1 6
- Figure II.1 Variétés allotropiques du carbone. 20
- Figure II.2 Structure cristalline du graphène. 21
- Figure II.3 Réseau de Bravais du graphène idéal. 21
- Figure II.4 Mécanisme d'hybridation sp^2 des orbitales atomiques du carbone. 22
- Figure II.5 Liaisons « σ » dans le graphène. 23
- Figure II.6 Liaisons « π » dans le graphène 23
- Figure II.7 Diagramme d'orbitale moléculaire. 23
- Figure II.8 Transistor à effet de champ à canal en graphène (GFET). 24
- Figure II.9 ISFET à canal en graphène. 25
- Figure II.10 Schéma du modèle capacitif d'un GFET. 26
- Figure II.11 Schéma du condensateur à base de graphène monocouche montrant les paramètres physiques et électrique, les charges et les potentiels..... 26
- Figure II.12 La Double Couche Electrique formée lors d'un contact métal (graphène)- électrolyte. 29
- Figure II.13 Caractéristique I_{DS} (A)- V_{GS} (V) pour des différentes valeurs de la capacité de la double couche électrique 30
- Figure III.1 Schéma du capteur de ph à base d'IS-GFET 35
- Figure III.2 ψ_0 en fonction de pH en considérant le SIO2 comme oxyde supérieur.... 37
- Figure III. $3I_D-V_G$ du capteur de pH pour plusieurs valeurs de pH 37

- Figure III.4 $V_{GS-DIRAC}$ pour plusieurs valeur de pH. 38
- Figure III.5 Suiveur de la tension du Dirac.. 38
- Figure III.6 Schéma synoptique proposé..... 39
- Figure III.7 circuit de lecture de type CVCC ISFET..... 40

Liste des tableaux

- **Tableau I.1** Caractéristiques des couches insensibles pour la détection du PH d'un capteur ISFET [22]. 17
- **Tableau II.1.** Paramètres de modélisation. 31
- **Tableau III.1** Valeurs des paramètres utilisées dans le model de liaison de site pour différents oxydes35

Introduction Générale

Les capteurs chimiques et biologiques ont une grande importance dans une large gamme d'applications telles que les diagnostics médicaux, la sécurité alimentaire, la détection d'explosifs, et la surveillance environnementale. Une classe très prometteuse de capteurs biologiques et chimiques sont les capteurs à base de transistor à effet de champ (FET). Les capteurs à base de FET ont suscité un intérêt croissant au cours des trois dernières décennies. Cet intérêt est motivé par le besoin de biocapteurs à faible coût capables de détecter directement et rapidement les mesurandes chimiques et biologiques sans nécessiter d'étapes de marquage, qui sont très coûteuses et longues. En tant qu'outil de diagnostic médical, cela augmenterait les taux de survie des patients en réduisant la charge sur les installations de diagnostic centralisé (cela est vécu avec le COVID-19).

D'autre part, la mesure du pH d'une solution est très importante également et elle est largement utilisée dans une gamme de disciplines (e.g chimie, ingénierie, biologie, environnement, science,...etc.), aussi bien en laboratoire que sur le terrain. À ce titre, plusieurs techniques ont été développées pour la mesure avancée de pH. Les applications les plus courantes pour la détermination du pH sont basées sur la potentiométrie, utilisant généralement une électrode en verre. Dans ce contexte, l'ISFET est utilisé depuis de nombreuses années pour mesurer la valeur du pH des solutions d'électrolytes. Il a été introduit pour la première fois par Bergveld en 1970. Les ISFETs ont suscité une attention considérable en raison de leur compacité, de leur faible coût et de leur facilité de fabrication. Récemment, des capteurs de pH à base de FET (pH-FET) ont également été utilisés pour le séquençage du génome humain. En raison de l'importance technologique des ISFETs, le développement et l'amélioration de ces dispositifs est indispensable. Viser des ISFET à haute performance et à faible coût est considéré comme un chemin prometteur pour le développement de ces dispositifs importants. Notant que l'implication de nouveaux matériaux dans la composition des ISFETs est considérée comme une approche prometteuse en la matière.

Considérant les avancements technologiques susmentionnés, ce mémoire consiste à étudier et modéliser un capteur de pH à base de transistor à effet de champ à canal en graphène. Le graphène est considéré dans ce travail en raison de sa haute sensibilité à son environnement local et ainsi à son faible coût de fabrication. La modélisation suivie est basée sur l'approche dérive-diffusion. Ce mémoire comporte l'analyse conceptuelle et physique des

phénomènes pertinents, la modélisation analytique, la programmation, la visualisation des courbes décrivant le comportement du capteur, et l'analyse et la discussion des résultats.

Chapitre I

Chapitre 1

Généralités sur Les capteurs de pH

1.1 Introduction

Mesurer le pH à haute résolution est important pour la surveillance alimentaire, pharmaceutique, agricole, biomédicale et environnementale. Par exemple, le pH intracellulaire joue un rôle important dans le métabolisme cellulaire. Une déviation du pH tissulaire peut être un indicateur d'une tumeur maligne. De plus, le pH sanguin d'un adulte en bonne santé varie de 7,35 à 7,45 unités. Tout écart chronique peut être un indicateur de certaines maladies, comme l'acidose, etc., qui peuvent être mortelles dans des cas extrêmes. La solubilité, la stabilité et la perméabilité d'un médicament à travers la membrane biologique dépendent également du pH, et par conséquent, une mesure précise à l'aide d'un capteur miniaturisé peut être très utile. En outre, la solubilité des métaux lourds, tels que le plomb, le

zinc et le cuivre, dans le sol dépend également du pH, et par conséquent, la mesure du pH est également importante pour l'environnement.

1.2 Notion de pH

Bien qu'il s'agisse en fait d'un paramètre chimique, le pH est habituellement classé parmi les caractéristiques technologiques parce qu'il influence de façon très importante sur l'aptitude à la conservation et à la transformation des viandes (Hofmann, 1988; Bruce et Ball, 1990) [1]. Le pH est un facteur important dans toute étude d'adsorption, du fait qu'il peut influencer à la fois la structure d'adsorbant et d'adsorbât ainsi que le mécanisme d'adsorption. Ce facteur dépend de l'origine des eaux à traiter et du procédé de leurs traitements (coagulation, floculation, oxydation...). Donc, il est judicieux de connaître l'efficacité d'adsorption à différents pH [1]. C'est l'abréviation du terme potentiel hydrogène, Le potentiel hydrogène (pH) mesure l'activité chimique des ions hydrogènes (H^+) en solution ; il mesure donc son acidité ou sa basicité [2]. Le pH de l'eau pure à 25°C est égal à 7, c'est cette valeur qui a été choisie comme référence d'un milieu neutre. Un milieu acide est caractérisé par la présence d'ions oxonium H_3O^+ qui proviennent de la fixation sur une molécule d'eau d'un proton H^+ . Une solution aqueuse est donc considérée comme acide si elle contient plus d'ions H_3O^+ que l'eau pure, son pH est alors inférieur à 7. Un milieu basique est quant à lui caractérisé par la présence d'ions hydroxydes HO^- formés par perte d'un proton H^+ par une molécule d'eau. Si une solution aqueuse contient plus d'ions HO^- que l'eau pure, elle est basique et son pH est supérieur à 7. Le pH est un facteur logarithmique : quand une solution devient dix fois plus acide, son pH diminue d'une unité. Si elle devient 100 fois plus acide, le pH diminuera alors de deux unités. Et ainsi de suite (3 unités pour un facteur 1000, etc.). Quelque soit la pureté d'une eau elle est toujours conductrice. Cette conductibilité est due à la dissociation (très faible) de l'eau en ions hydrogène (H^+) et hydroxyde (OH^-). Dans n'importe quelle solution aqueuse sont toujours présentes les trois espèces chimiques molécule d'eau « H_2O » ion hydronium « H_3O^+ » et ion hydroxyde « OH^- ». Dans l'eau pure il y a autant d'ions hydronium que d'ions hydroxyde OH^- . Lorsqu'on dissout un soluté dans de l'eau pure, après dissolution :

- Si $[H_3O^+] = [OH^-]$, la solution est neutre.
- Si $[H_3O^+] > [OH^-]$, la solution est acide
- Si $[H_3O^+] < [OH^-]$, la solution est basique.

Les populations en ions hydroxyde et en ions hydronium ne sont pas indépendantes, ces populations sont arisées par la réaction réversible : $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- = 2\text{H}_2\text{O}$. Cette réaction se déplace vers la droite ou vers la gauche, de façon qu'une fois la solution d'équilibre atteinte, au bout d'un temps très court.

$$[\text{H}_3\text{O}^+]. [\text{OH}^-] = K_e.$$

La constante « K_e » est appelée « produit ionique de l'eau ». C'est un nombre sans unité qui dépend de la température de la solution aqueuse. Il faut tenir qu'à 25°C, $K_e = 10^{-14}$ (sauf précision contraire toutes les solutions aqueuses étudiées sont supposées être à 25°C) [3].

1.3 Le pH à température ambiante

- Le pH de l'eau pure est de 7; l'eau est dite neutre.
- Si le pH est compris entre 0 et 7, l'eau est dite acide.
- Si le pH est compris entre 7 et 14, l'eau est dite basique ou alcaline.

1.3.1 Mesure de pH

1.3.1.1 Indicateur coloré

Un indicateur coloré est une espèce chimique qui change de couleur en fonction de la valeur du pH. Par exemple, le BBT est un indicateur coloré qui est bleu en milieu basique, vert en milieu neutre, et jaune en milieu acide. Si l'on introduit quelques gouttes de BBT dans une solution aqueuse, celle-ci prend une teinte que l'on compare à une échelle de teinte (qui sert de référence). Introduire quelques gouttes d'un indicateur coloré dans une solution permet donc de déterminer l'ordre de grandeur de son pH, mais pas la valeur précise du pH.

1.3.1.2 Mesure au papier pH

Le papier pH est une bande de papier imbibée d'un indicateur universel. L'indicateur universel est constitué d'un mélange d'indicateurs colorés dont les teintes varient graduellement en fonction du pH. Le papier pH a donc une teinte qui varie en fonction de la valeur du pH. Le papier pH se présente sous la forme de bandes étroites de papier. L'échelle des teintes de l'indicateur en fonction du pH est imprimée sur le boîtier.

1.3.1.3 Échelle de pH

En théorie la valeur du pH peut s'étendre de $-\infty$ à $+\infty$. Mais en pratique, on ne mesure que le pH des solutions diluées. Mesure de l'acidité ou de l'alcalinité d'une solution en fonction de

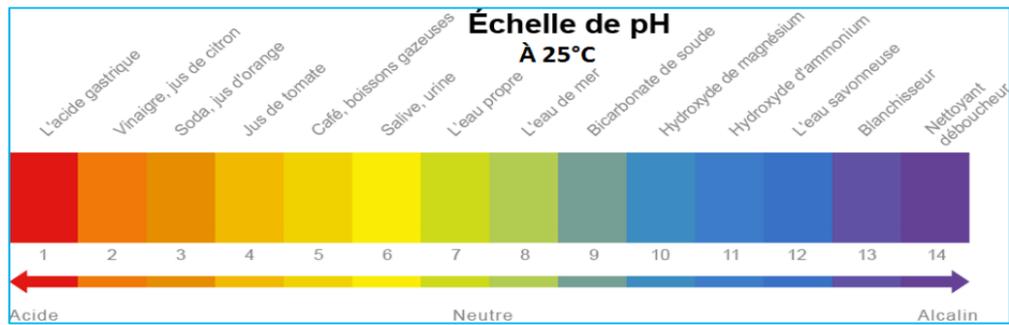


Figure I.1 Échelle du pH à 25°C.

sa concentration en ions hydrogènes et suivant une échelle logarithmique de 1 à 14(1) à 25°C [5]. En déposant une goutte de solution (de pH inconnu) sur un morceau de papier pH, on détermine une valeur approximative de la valeur du pH en comparant la couleur obtenue avec celle de l'échelle.

1.3.1.4 Mesure au pH-mètre

On peut mesurer la valeur du pH avec un **pH-mètre**. Le pH-mètre est un appareil qui indique la valeur du pH d'une solution aqueuse. La mesure est basée sur une méthode potentiométrique dont le principe repose sur la variation de la différence de potentiel entre deux électrodes. Le pH-mètre est ainsi constitué de deux électrodes : l'une a un potentiel connu (ou de référence) et l'autre (électrode indicatrice) dont le potentiel varie

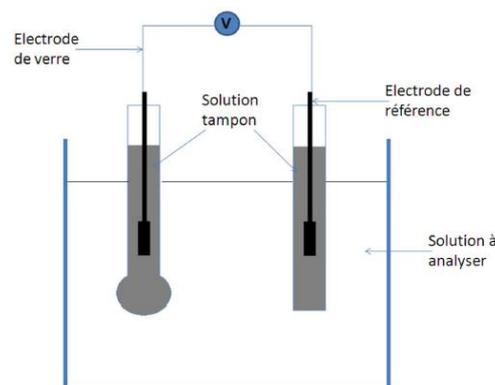


Figure I.2 Schéma de principe d'un ph mètre [7].

proportionnellement au pH.

l'électrode de référence est généralement saturée en chlorure de potassium (KCl) avec un potentiel de 0,244V à 25°C pour l'électrode au calomel saturée. Les plus utilisées étant des électrodes en calomel ($Hg_2 Cl_2$) ou chlorure d'argent ($AgCl/Ag$). La contre

électrode indicatrice est en verre. La valeur du pH de la solution est alors déduite de la différence de potentiel entre les deux électrodes.

1.3.1.4.a Qu'est-ce qu'un pH-mètre ?

Un pH-mètre est en fait un voltmètre précis qui mesure la tension générée par les électrodes de pH. L'exigence de ce compteur est une impédance d'entrée élevée et le gain de la conversion tension-pH. La sonde pH standard génère une tension d'environ 59mV par pH, donc tout ce dont nous avons besoin est un préamplificateur avec une entrée d'impédance

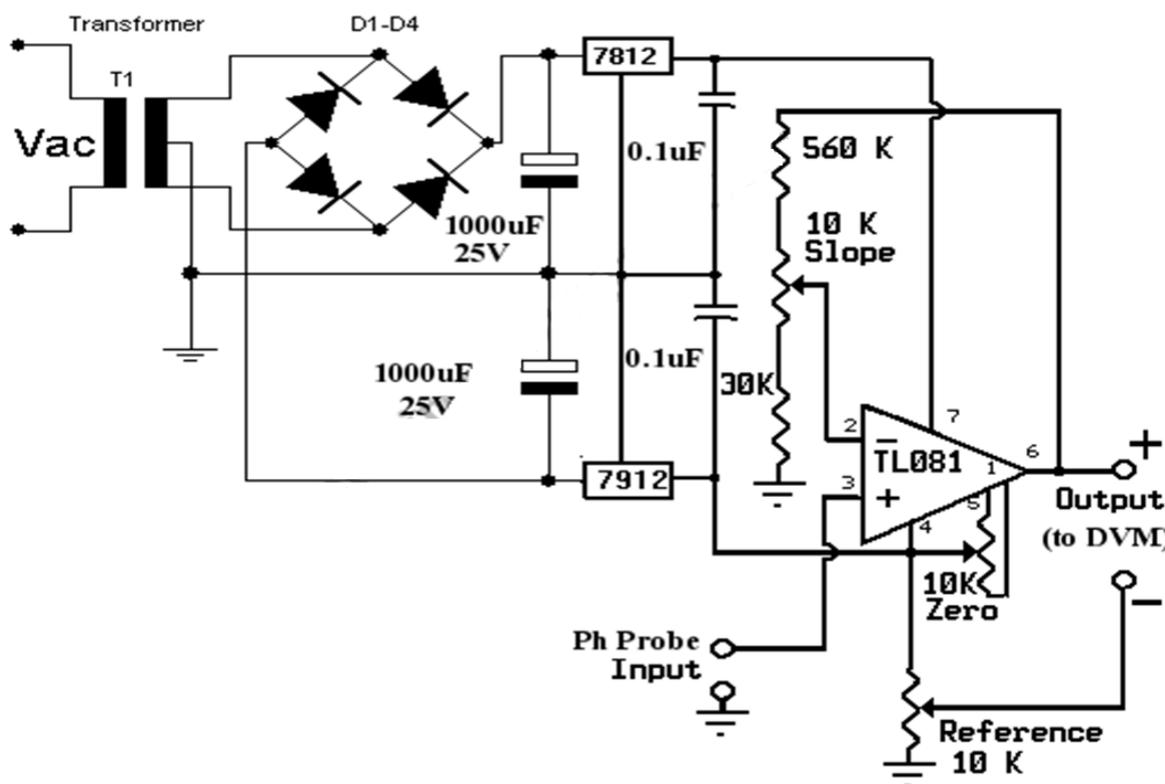


Figure I.3 Circuit électronique d'un PH-mètre.

élevée et avec un gain=16.7 pour donner 1 Volt par pH. Le schéma du circuit du pH-mètre est présenté ci-dessous

Ce circuit de pH-mètre utilise une impédance d'entrée élevée à gain élevé op-AMP TL081. La tension du transformateur est centrale taraudée 15V (15V-0V-15V). La résistance variable à plusieurs tours est recommandée pour les résistances de zéro, de pente et de référence. La consommation de courant de ce circuit de pH-mètre doit être très faible, de sorte que le régulateur CI 7812 et 7912 n'aura pas besoin de dissipateur thermique.

1.3.1.4.b Étalonnage du pH-mètre

Pour étalonner le circuit pH-mètre, Il faut suivre les étapes suivantes :

- Annuler l'amplificateur en court-circuitant l'entrée de la sonde pH à la terre.
- Mesurer la tension entre la sortie+ et la terre.
- Régler le potentiomètre de zéro jusqu'à ce que le voltmètre indique zéro volt (ou presque zéro).
- Connectez maintenant l'entrée de la sonde pH à une source de tension de 413 mV. Vous pouvez utiliser un potentiomètre pour créer une source de tension simple de 413 mV. Après avoir branché l'entrée à la source de 413 mV, mesurer la + sortie et la terre à l'aide du voltmètre numérique et lire 7,00 volts. Si ce n'est pas le cas, régler le potentiomètre de pente jusqu'à ce que la valeur la plus proche soit de 7,00 volts. Court-circuiter l'entrée de la sonde de pH à la terre. Connecter le voltmètre numérique entre – sortie et + sortie. Régler maintenant le potentiomètre de référence jusqu'à ce que le voltmètre indique 7,00 volts. Cela correspond au pH neutre de 7.
- Connecter l'entrée de la sonde de pH à une électrode de pH (sonde de pH/capteur), maintenant le pH-mètre est prêt à l'emploi. La valeur du voltmètre en volts serait la conversion directe du pH. La valeur de pH de 7 serait lue comme 7 volts, pH 3 comme 3 volts, etc. Avec le voltmètre numérique (DVM), nous pouvons facilement obtenir une précision de pH de 0,05 si nous suivons la méthode d'étalonnage décrite ci-dessus.

1.4 Développement de la mesure de PH

La mesure du pH par des dispositifs microélectronique intégrés a été développée avec l'apparition des dispositifs à effet de champs de type ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor). Ces dispositifs sont limités par la loi de Nernst à des sensibilités de 60mV/pH. Le développement des micros technologies a permis depuis, la réalisation de capteurs de type SGFET (Suspended Gate Field-Effect Transistor). Ces structures réalisé par micro-usinage de surface et procédés MOS classique permettent d'atteindre des sensibilités bien plus élevées.

1.5 Les transistors à effet de champs

Le principe du transistor à effet de champ (FET : Field Effect Transistor) a été décrit la première fois par Shockley en 1952 (6). Le transistor à effet de champ dénommé FET ou TEC repose sur le fonctionnement d'un dispositif semi-conducteur unipolaire, c'est-à-dire. Qu'un seul type de porteur intervient. Ainsi, pour une utilisation aux hautes fréquences, il est

préférable que le type de porteur responsable de l'effet transistor soit celui présentant les meilleures propriétés de transport : mobilité, vitesse et coefficient de diffusion. Les électrons possèdent des propriétés plus intéressantes que les trous les FET sont essentiellement élaborés sur du matériau de type N. Leur principe peut être comparé à une résistance semi-conductrice dont la section est modulée par une jonction polarisée en inverse [7].

1.5.1 Le transistor MOSFET

La découverte des propriétés semi-conductrices de certains matériaux au 17^{ème} siècle, était sans grande incidence sur le monde scientifique dont les physiciens les plus éminents méprisaient ces matériaux et considéraient qu'ils étaient impurs et non respectables [8]. En 1930, L. Lilienfeld de l'Université de Leipzig dépose un brevet dans lequel il décrit un élément qui ressemble au transistor MOSFET actuel. Cependant, ce n'est que vers 1960 que, la technologie ayant suffisamment évolué, de tels transistors ont pu être réalisés avec succès. En particulier, les problèmes d'interface oxyde-semi-conducteur ont pu être résolus grâce à l'affinement de la technologie dans le domaine bipolaire, affinement requis pour obtenir des transistors de meilleure qualité. Aujourd'hui le transistor MOSFET constitue, par sa simplicité de fabrication et ses petites dimensions, l'élément fondamental des circuits intégrés numériques à large échelle.

1.5.2 Principe de base d'un transistor MOSFET

Le principe de fonctionnement d'un transistor MOSFET repose sur l'effet de champ, qui consiste à moduler de façon électrostatique une densité de charges mobiles dans un semi-conducteur. La modulation est provoquée par un champ électrique perpendiculaire à la direction du mouvement de ces charges. La structure du MOSFET se décompose en trois parties principales : l'électrode de grille (G) qui commande l'intensité du champ électrique vertical et par conséquent la densité de charges mobiles, les électrodes de source (S) et de drain (D) séparées par un canal de conduction qui conduit le courant en fonction de son niveau de remplissage en charges mobiles. La figure 1.4 et 1.5 qui suit illustre l'effet de champ dans un transistor MOSFET [9].

La grille est polarisée par la tension grille-source V_{GS} . Les charges sont mises en mouvement par l'intermédiaire du champ électrique longitudinal lié à l'application d'une tension entre le drain et la source V_{DS} . La source sert de référence de potentiel. Les tensions V_{GS} et V_{DS} permettent de contrôler le courant qui passe dans le canal. Le dopage du canal N_A ,

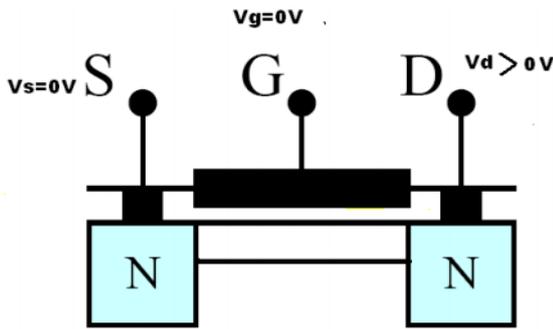


Figure I.4 : Canal vide: courant nul

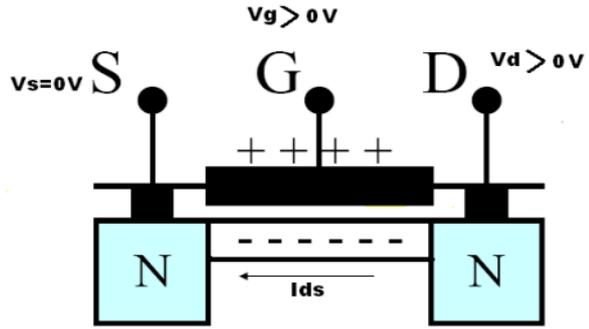


Figure I.5 : Canal rempli: courant non nul [14]

la profondeur X_j des jonctions source et drain, la longueur de masque L entre drain et source, la largeur de masque W et l'épaisseur t_{ox} de l'oxyde de grille sont les paramètres caractéristiques d'un transistor MOSFET conventionnel. Avec la réduction de la taille du transistor, la différence entre la longueur du masque L et la longueur effective L_E n'est plus négligeable. De même pour la largeur effective du canal W_E . Deux paramètres correctifs sont alors introduits [9]. Ils sont définis par:

$$\Delta L = L - L_E \dots\dots\dots(1)$$

Et

$$\Delta W = W - W_E \dots\dots\dots(2)$$

1.5.3 Principe de fonctionnement

Le transistor MOSFET est un transistor à effet de champ constitué d'un substrat semi-conducteur (B) recouvert d'une couche d'oxyde sur laquelle est déposée l'électrode de grille (G). Par le biais d'une différence de potentiel appliquée entre grille et substrat, on crée, dans le semi-conducteur, un champ électrique qui a pour effet de repousser les porteurs majoritaires loin de l'interface oxyde-semi-conducteur et d'y laisser diffuser des minoritaires venus de deux îlots de type complémentaire au substrat, la source (S) et le drain (D). Ceux-ci forment une couche pelliculaire de charges mobiles appelée canal. Ces charges sont susceptibles de transiter entre le drain et la source situés aux extrémités du canal (figure I.6). Dans cette même figure, on a également représenté les symboles des transistors MOS à canal n et à canal p. La flèche indique le sens de conduction des jonctions substrat-source (BS) et substrat-drain (BD).

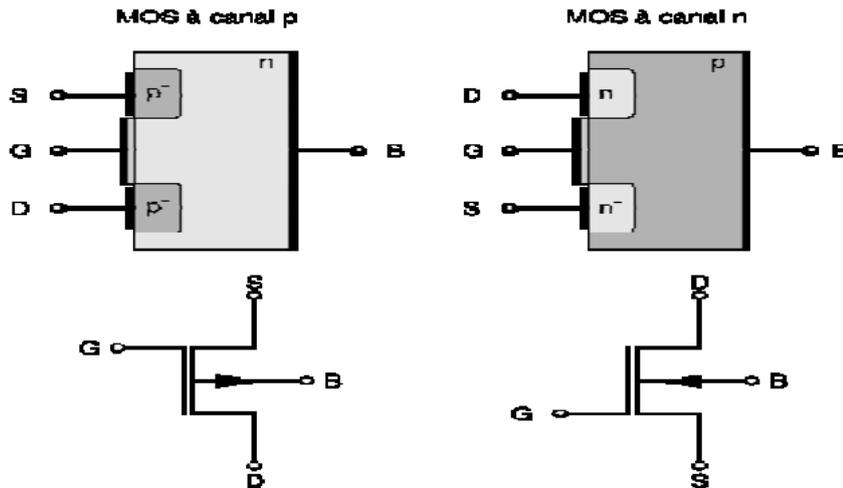


Figure I.6 structures et symboles des transistors MOSFET.

1.5.4 Architecture générale du transistor MOSFET

Le transistor MOSFET est constitué de quatre électrodes qui sont la grille, la source, le drain et le substrat (voir figure I.7). Ses dimensions caractéristiques sont :

L_g : la longueur de la grille du transistor ;

L : la longueur électrique du canal du transistor ;

ΔL : la diffusion des extensions de la source et du drain sous la grille ;

X_{ext} : la profondeur des extensions ;

$X_{S/D}$: la profondeur des jonctions source et drain ;

T_{ox} : l'épaisseur de l'oxyde de grille ;

W : la largeur du canal.

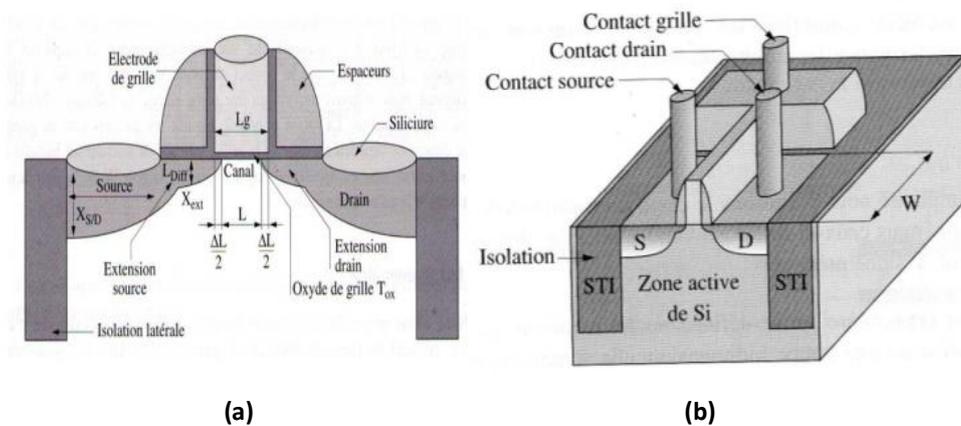


Figure I.7 (a) Schéma de principe d'un MOSFET conventionnel et définition des termes.(b) Représentation de la vue en trois dimensions du MOSFET

1.6 Les Capteurs ISFETs

1.6.1 Introduction

Le concept de détection des effets de champ a été introduit par Bergveld [10] au début des années 1970. Il a été constaté que la concentration d'ions Na^+ dans un électrolyte peut être détectée en surveillant le courant circulant du drain à la source (I_{DS}) d'un ISFET à pH constant. En fait, l'ISFET est similaire à un transistor métal-oxyde-semi-conducteur à effet de champ (MOSFET).

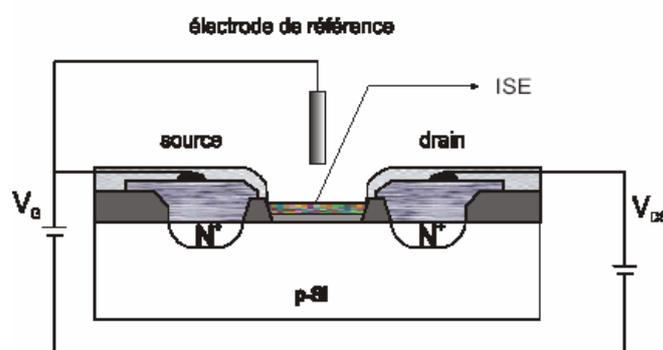


Figure I.8 Schéma d'un capteur ISFET [2].

Les capteurs ISFET présentent de nombreux avantages par rapport aux électrodes pH-verre classiques [11, 12]. En raison de leur petite taille et de leur réponse rapide, les dispositifs ISFET présentent des avantages, par rapport aux électrodes ioniques sélectives conventionnelles, de mise en œuvre dans des circuits intégrés basés sur la technologie complémentaire des (CMOS), en particulier dans les applications biomédicales, comme la détection de l'hybridation de l'ADN [13, 14], la détection de bio-marqueurs à partir du sang [15], la détection d'anticorps [16], la mesure du glucose [17] et la détection du pH [18]. En bref le principe de mesure de pH dans ce cas est basé sur le principe de transistors à effet de champs appelé ISFET, on utilise un Transistor MOSFET disposant d'une couche sensible a ph a la place de l'habituel grille métallique. Les ions hydrogène positive s'agglutine sur cette couche entrainant une séparation de charge de l'autre côté, la zone entre la source et le drain devient ainsi conductrice, le flux de courant créer est directement proportionnelle à la valeur du ph.

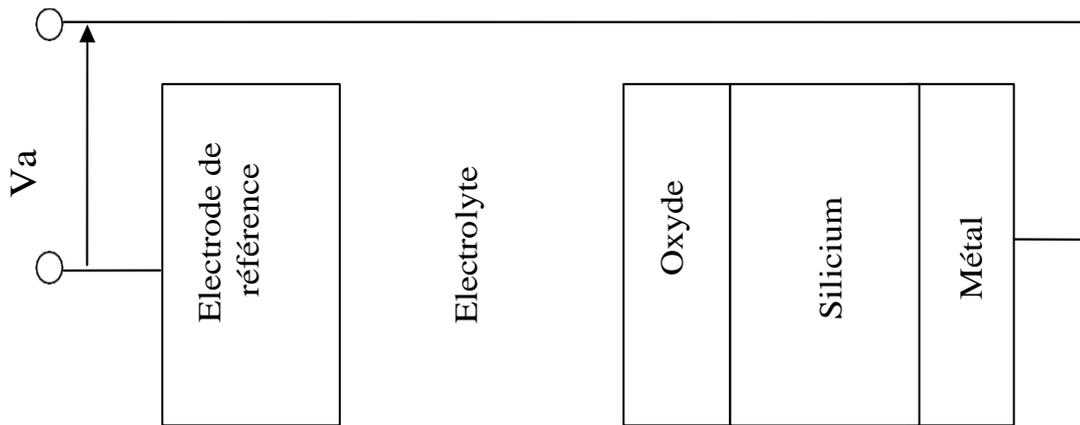


Figure I.9 Schéma de la structure EOS [16].

La structure de base d'un ISFET est similaire à celle d'un MOSFET (Métal-Oxyde-Semi-conducteur Field-Effect Transistor), avec une électrode de grille remplacée par une membrane sélective appelée la couche "ion sensible" (Si3N4, Al2O3, Ta2O5,...). La surface de cette membrane constituant en partie l'isolant de la grille réagit avec les ions H3O+ présents dans le liquide ; en conséquence, une variation du pH affecte la tension de seuil de l'ISFET en modifiant le potentiel électrolyte-isolant [19]. 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 cause une variation du potentiel chimique ψ et donc de la tension de seuil du transistor V_T .

1.6.2 Description analytique

L'ISFET est un MOSFET avec la connexion de la grille séparée de la puce sous la forme d'une électrode de référence insérée dans une solution aqueuse qui est en contact avec l'oxyde de la grille. L'expression générale du courant de drain du MOSFET et donc aussi de l'ISFET en mode non saturé est :

$$I_d = C_{ox} \cdot \mu \frac{w}{L} [(V_{gs} - V_t)V_{ds} - \frac{1}{2}V_{ds}^2] \dots \dots \dots (3)$$

Avec

Cox : la capacité d'oxyde par unité de surface.

W et L : largeur et la longueur du canal, respectivement.

μ : mobilité électronique dans le canal.

Cette équation correspond aux caractéristiques $I_{DS}(V_{DS})$ pour des tensions V_{DS} faibles par rapport à $V_{GS}-V_T$. Mais lorsque V_{DS} tend vers $V_{GS}-V_T$, la densité d'électrons au niveau du drain décroît et tend vers 0. Augmenter V_{DS} n'entraîne pas alors un accroissement d' I_{DS} . En effet, à l'issue de cette zone de résistance variable, I_{DS} atteint la valeur limite dite courant de saturation:

$$I_{ds, saturation} = \frac{W\mu C_{ox}}{2L} (V_{gs} - V_t)^2 \dots\dots\dots (4)$$

1.6.3 Principe de fonctionnement

« En utilisant les ISFET comment mesurer la concentration des protons dans une solution ? » Il existe plusieurs théories qui expliquent ce phénomène nous allons présenter deux théories.

La première est celle de Nicolski et Eisman et dites aussi la théorie d'échange d'ions. Cette méthode est adaptée à des électrodes conventionnelles, en polymère ou en verre dont les membranes sont épaisses. En revanche elle semble moins bien adaptée au cas des ISFETs pour lesquels les membranes sont fines.

Sui et Cobbold ont expliqué le mécanisme de réponse de l'ISFET en utilisant le modèle de liaison par sites ('site binding theory'). Selon ces auteurs, la réponse de l'ISFET aux variations de pH n'est pas causée par la diffusion des ions d'hydrogène dans la couche isolante car cette diffusion nécessiterait trop de temps (ordre de grandeur par secondes comme ce qu'étaient observées dans les électrodes conventionnelles) par rapport aux temps de réponse de l'ordre de millisecondes observés dans le cas des ISFETs.

1.6.3.1 Les doubles couches électrochimiques

Les deux parties de la partie solide et liquide portent un niveau d'énergie différent qui conduit à l'attention à leur interface une fois qu'ils entrent en contact étroit. Fondamentalement toutes les substances intrinsèquement portent une charge négative une fois qu'ils sont dispersés dans l'eau. Ceci est causé par la haute constante diélectrique de l'eau, généralement la surface avec une constante diélectrique inférieure portent une charge de surface anionique, l'eau contient des ions de sels minéraux, attirant par la charge de surface ces ions rassemblent autour de la particule une couche immobile bien ordonnée couvre la surface de la particule comme une peau cette couche est également appelée couche stationnaire ou couche Stern, ions

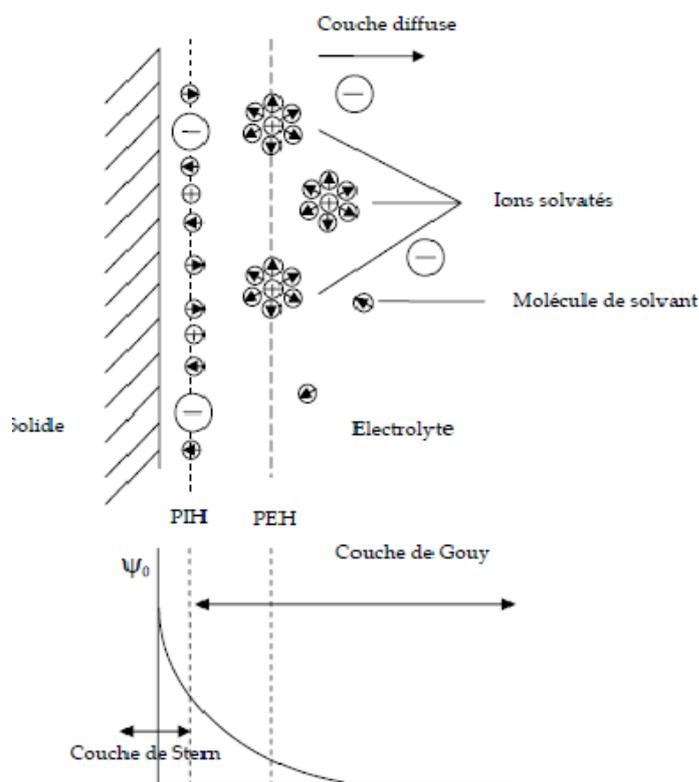


Figure I.10 représentation schématique de double couche électrique à l'interface solide électrolyte

cationiques neutralisent la charge de surface anionique, toutefois, comme les ions sont souvent entourés de molécules d'eau, ils sont plutôt gros et ne peuvent pas neutraliser complètement la charge superficielle, une charge anionique résiduelle demeure. Cette charge anionique restante attire d'autres ions de l'eau de substitution de sorte qu'une deuxième couche se développe autour de la particule cette couche est plus éloignée de la surface de la particule. La force attrayante des charges anioniques s'affaiblit avec la distance, donc cette deuxième couche est moins ordonnée et mobile la deuxième couche est appelée couche diffuse ou couche « gouy-chapman » est communément appelé nuage de contre-ions.

La limite entre les ions stationnaires et les ions diffus est un plan de cisaillement, le potentiel de cette limite est appelé potentiel de poupe ou de flux, si les ions diffus sont déplacés de la particule qu'ils entourent, une différence potentielle est créée et peut être mesurée.

1.6.3.2 Matériaux sensible aux ions d'hydrogène

Il existe trois propriétés nécessaires de matériaux constituant la grille qui assure le fonctionnement du capteur [21] :

- être sensible et sélectif à l'ion a détecté
- être passivant a la surface du silicium pour cela il faut isoler et protéger le canal du transistor de la solution à analyser.
- Présenter une bonne barrière à la diffusion et à la migration des ions

Il est difficile de trouver un seul matériau qui possède ces trois propriétés en même temps. En pratique, le matériau de grille est généralement constitué par la combinaison de plusieurs diélectriques. Donc l'amélioration des propriétés des capteurs ISFETs passe par l'investigation et l'optimisation des matériaux de détection et de leurs dépôts afin de booster la sensibilité, la sélectivité, la stabilité et la durée de vie.

Les principales membranes sensibles aux ions hydrogène sont présentées avec leurs caractéristique aux tableaux suivants :

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

Tableau I.1 Caractéristiques des couches insensibles pour la détection du PH d'un capteur ISFET [22]

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu sur le mesurande qui est le pH dans notre cas, et sur les différentes méthodes de la mesure de pH. Le chapitre a comporté l'évolution des capteurs électronique de pH à savoir les ISFETs qui sont des détecteurs prometteurs de pH et de biomolécules. Les concepts principaux du FET, l'interface électrolyte-oxyde, et les ISFETs ont été également présenté dans ce chapitre.

Chapitre II

Chapitre 2

Modélisation analytique d'un capteur chimique à base de GFET

2.1 Introduction

Les capteurs chimiques à base d'ISFET ont donné des bénéfices considérables à la détection des mesurandes chimique. Cependant, avec la miniaturisation des FETs et la nécessité des capteurs chimiques miniaturisés à haute performance (haute sensibilité, fiabilité, stabilité, ...etc.), l'exploitation des matériaux émergents devient de plus en plus indispensable afin de surmonter les obstacles rencontrés avec les FETs à base de silicium. Le graphène est l'un des matériaux plus prometteur en la matière.

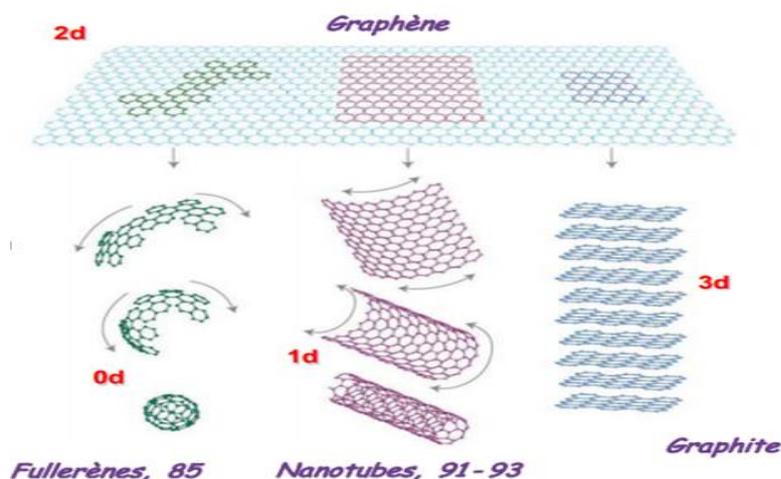


Figure II.1 Variétés allotropiques du carbone [23].

2.2 Variétés allotropiques du carbone

Le carbone est le 15^{ème} élément naturel le plus présent sur terre, c'est un élément de colonne IV du tableau périodique de Mendeleïev. L'atome de carbone possède six électrons ayant la configuration atomique: $1s^2 .2s^2. 2p^2$. Il se présente sous de nombreuses variétés allotropiques dont la plus anciennement connue est le graphite, extrait des mines de crayon dès le 16^{ème} siècle. Les différentes variétés allotropiques du carbone sont présentées sur la figure II.1. Ces variétés allotropiques: fullerène (0-D), nanotubes de carbone (1-D), graphène (2-D) et graphite (3-D), se distinguent par leurs géométries, et donc le mouvement des porteurs en fonction [23].

2.3 Le graphène

En 2004, Novoselov et *al.* ont synthétisé pour la première fois une nouvelle forme allotropique stable de matériau carboné : le graphène [24]. Le graphène est un plan unique de graphite, de l'épaisseur d'un atome. Sa croissance sur une plaque monocristalline semi-conductrice de carbure de silicium SiC permet de découper des structures de graphène nanométriques, qui serviront d'électrodes ou de canal de transistor. Ceci permet en principe de positionner et d'interconnecter des millions de dispositifs à base de graphène [25]. Il est étonnant de constater qu'il est (historiquement) le membre le plus jeune de la famille graphitique [26]. On peut le considérer comme un mono-plan de graphite ou comme la limite infinie des hydrocarbures aromatiques polycycliques [27]. Du point de vue théorique, le graphène est un système électronique bidimensionnel parfait [28]. Présente une structure cristalline hexagonale dit en nid d'abeille, comme le montre la figure II.2.

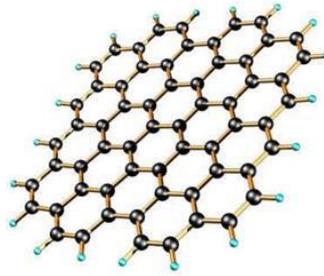


Figure II.2 Structure cristalline du graphène [23].

Cette structure cristalline fait du graphène un matériau doté de nombreuses propriétés, telles que : la souplesse, une conduction thermique et électrique excellente et la transparence. La caractéristique la plus importante du graphène est sa plus grande mobilité de tous les semi-conducteurs canaux par une mobilité qui peut atteindre $15000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ à température ambiante [23]. Cependant, il est évident que plus qu'une bonne mobilité caractéristique est nécessaire pour réaliser le transistor à effet de champ (FET), et des arguments intenses de divers points de vue sont nécessaires [29]. Les bandes de valence et de conduction se touchent en deux points appelés points de Dirac [30]. La structure cristallographique du graphène se compose d'une maille élémentaire triangulaire avec deux atomes par maille (voir figure II.3).

On appelle à la distance interatomique. La maille élémentaire est un losange et comporte deux types de sites que l'on notera **A** et **B**. On note a_1 et a_2 les vecteurs de base [31]. Le graphène peut être classé en 3 catégories : monocouche, bicouche et multicouche. Les

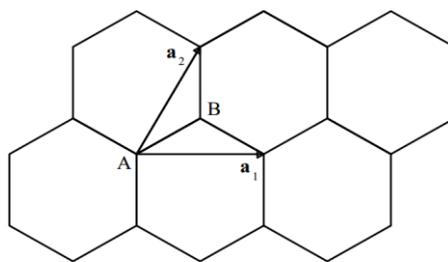


Figure II.3 Réseau de Bravais du graphène idéal [10].

formes de graphène bi- et multicouche disposent pour leur part d'autres propriétés. Plus le nombre de couches augmente, moins il est coûteux à produire [23].

2.4 Hybridation des orbitales

Les orbitales s et p excités, elles vont pouvoir se recombiner pour former de nouvelles orbitales stables dites « hybrides ». Ce mécanisme d'hybridation diffère selon les conditions de pression et de température. En effet l'orbitale 2s de l'atome excité de carbone peut s'appairer avec 2p et donner une hybridation sp. Quand deux orbitales (px, py) s'hybrident avec une orbitale 2s en liaison pz forment des angles de 120° entre eux (Voir figure II.4). Cette hybridation nous donnera la structure « nid d'abeille » du graphène. Enfin, toutes les orbitales de niveau n=2 peuvent s'hybrider sp³ et former une structure tétraédrique à l'origine de la structure cristalline du diamant [32]

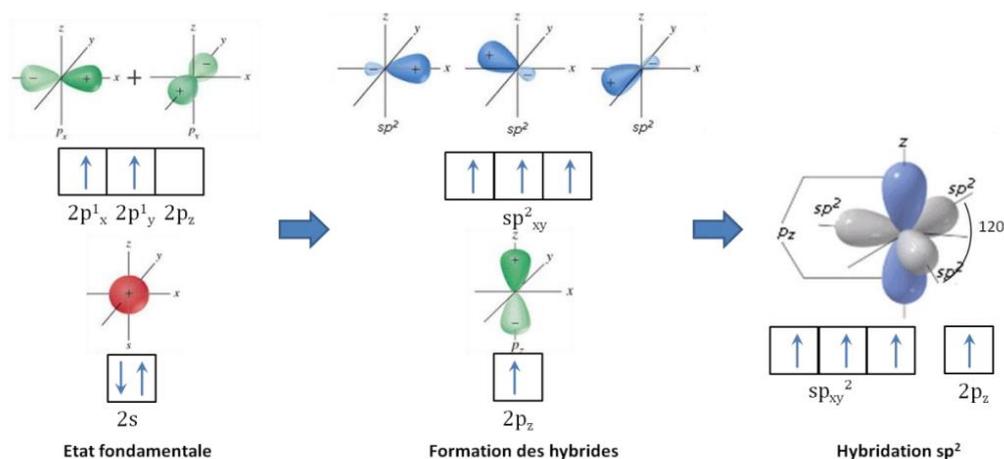
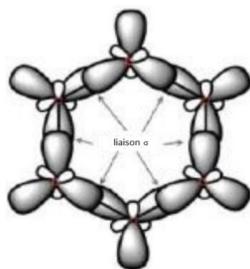


Figure II.4 Mécanisme d'hybridation sp^2 des orbitales atomiques du carbone [8].

Un atome sp^2 peut former trois liaisons chimiques. 2 orbitales hybrides sp^2 de deux atomes peuvent se recouvrir d'une manière coaxiale pour former une liaison simple covalente σ dans plan XY (Figure II.4) [26, 32]. Les liaisons entre atomes de carbone sont des liaisons covalentes, la distance inter atomique est $a = 1.42\text{\AA}$ [28]. Les angles de 120° entre chacune des orbitales forment naturellement au bout de 6 même atomes une structure régulière hexagonale à l'origine du réseau « nid d'abeille » du graphène [32]. Ces liaisons σ sont le recouvrement de façon axiale des orbitales atomiques de chaque atome qui garde la même orientation qu'à l'origine, comme le montre la (figure II.5). Ce sont des liaisons fortement énergétiques. La répartition des électrons se fait de façon symétrique dans le cylindre formé par les orbitales [23]. C'est pourquoi le graphène est chimiquement inerte [27].

Figure II.5 Liaisons « σ » dans le graphène [23].

Quant aux orbitales pz restées en hybridées, elles vont donner lieu à un recouvrement latéral π (Cette liaison est à l'origine de la formation des liaisons entre les atomes de carbone pour construire des matériaux comme le graphène multicouche, ou encore les nanotubes) liant et π^* anti-liant avec l'un de ses trois voisins (figure II-7). Ces doubles liaisons π , moins fortes que les liaisons covalentes ($\approx 250 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$), ce qui les rend plus faciles à casser. C'est grâce à ce phénomène que le graphène possède des électrons quasiment libres qui lui confèrent ces propriétés électroniques. Les liaisons π sont représentées sur la (figure II.6) [23]. De ce fait, chaque électron de 2 pz est libre de se déplacer et se délocalise sur toute la surface, ils y forment un gaz 2D d'électrons qui contribuera à l'excellente conduction électrique de graphène.

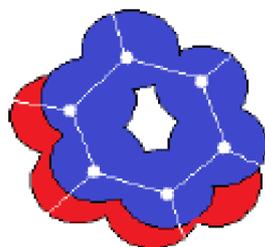
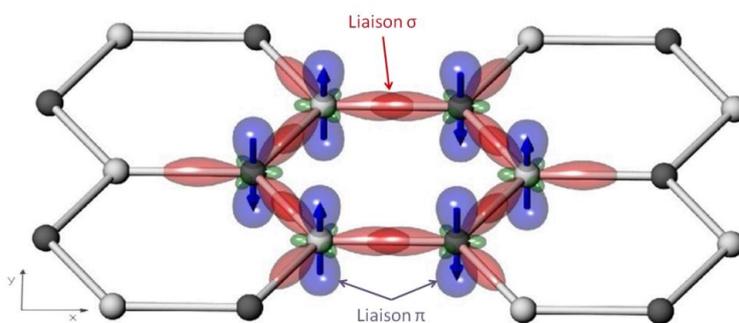
Figure II.6. Liaisons « π » dans le graphène.

Figure II.7 : Diagramme d'orbitale moléculaire

2.5 Le FET et le GFET

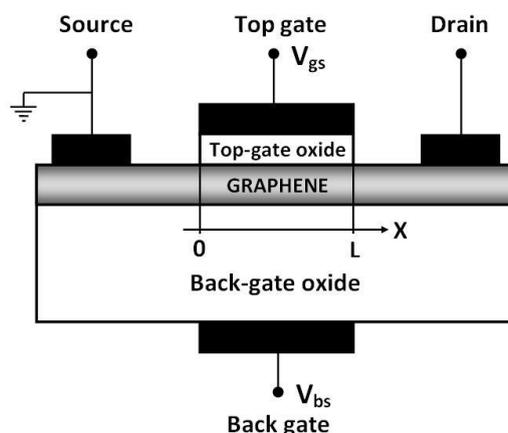


Figure II.8 Transistor à effet de champ à canal en graphène (GFET) [35].

Le phénomène appelé effet de champs dans les structures MOS est le fait de commander la conductivité de l'interface substrat/oxyde en appliquant une tension sur l'électrode de la grille, ce dernier crée un champ verticale qui par l'intermédiaire de la capacité MOS (grille-oxyde-substrat) augmente la densité des porteurs libres à l'interface substrat/oxyde. Le FET en effet est basé sur une grille, une région de canal qui fait la liaison entre l'électrode de la source et du drain, et une barrière séparant la grille et le canal, le but est de contrôler la conductivité du canal. Pour les application très rapides il faut des transistors qui répondent rapidement aux variation V_{gs} (la tension appliqué entre la grille et la source), il est utiles théoriquement d'utiliser des courtes grille et des porteurs plus rapides dans le canal, par ailleurs ces modifications causent des diminution de performance du dispositif et autres problèmes dites en Anglais *short gates effect* (effet de grilles courtes). Selon la théorie de *Scaling* des barrières et des grilles minces (verticalement mesurer) assurent les conditions demandées. La possibilité d'avoir un canal avec une seule couche d'atome a présenté le graphène comme matière essentiel pour les canaux des transistors FET moderne.

2.5.1 Description du dispositif

Le GFET à grille inférieure est constitué d'une couche de 300–nm de SiO_2 au-dessous du graphène, formant le diélectrique de la grille inférieure. Cette grille est formée de la silicone dopée. Ces GFETs à grille inférieure ne sont pas pratiques alors ils ont ajoutés une grille supérieure, ils sont construits en utilisant le graphène exfolié c.-à-d. cultivé sur métal généralement cuivre ou nickel, le diélectrique de la grille supérieure est fait par SiO_2 , Al_2O_3 , HfO_2 ou bien une solution.

2.5.2 Caractéristiques I-V (I_{DS} - V_{GS} / I_{DS} - V_{DS})

La différence de potentiel entre le canal et les grilles (supérieure et/ou inférieure) détermine la densité et le type de porteurs dans le canal (électrons ou trous), un large courant négative sur la grille conduit à un canal de type P, comme un large courant positive sur la grille conduit à un canal de type N.

2.5.3 Fonctionnement en mode capteur de pH

Un ISFET à base de graphène peut être considéré comme un FET à canal en graphène avec une légère différence sur la grille métallique isolée. Cela signifie qu'il existe une solution aqueuse entre la couche diélectrique supérieure et le contact du métal de la grille. Jusqu'au moment où le courant (I_{DS}) dépend du potentiel électrostatique de cette solution aqueuse et qu'elle peut le contrôler, la couche diélectrique qui joue le rôle de la membrane sensible aux ions peut affecter considérablement les performances de sensibilité du dispositif [33]. D'autre part, les mécanismes d'accumulation de charge à la surface du diélectrique sont décrits par la théorie de site binding et il est présenté comme un équilibre thermodynamique entre les groupes Si OH à la surface et les ions H^+ présents dans l'électrolyte [34].

2.5.4 Circuit capacitif et modélisation

Pour mieux comprendre l'électrostatique du dispositif GFET on représente le circuit

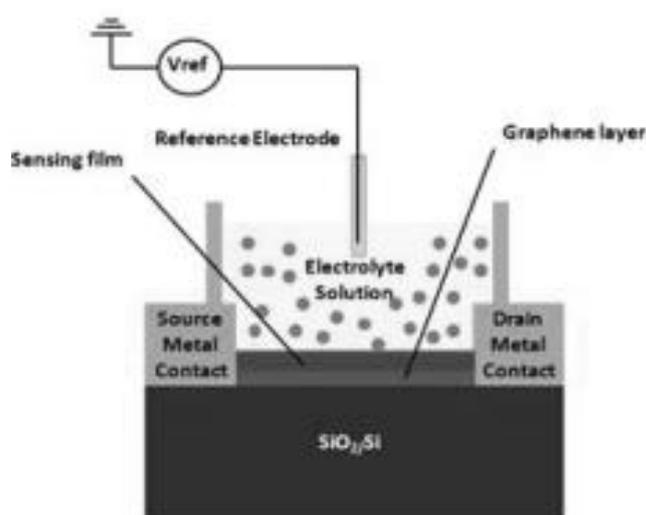


Figure II.9 ISFET à canal en graphène [34].

capacitif schématisé dans la figure ci-dessous

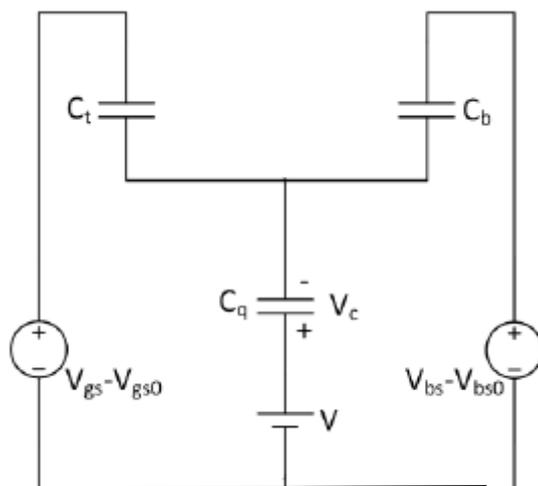


Figure II.10 Schéma du modèle capacitif d'un GFET [35]

On a C_t et C_b les capacités de l'oxyde de la grille supérieure et inférieure respectivement, C_q est la capacité quantique du graphène "*quantum capacitance*", le potentiel V_c est la tension aux bornes de la capacité C_q , $V(x)$ est la chute de tension aux bornes du canal à graphène. $V(x)$ est égale à zéro à la fin de la source ($x=0$) et elle est égale à la tension V_{ds} (tension entre le drain et la source) à la fin du drain ($X=L$), en effet $V(x)$ est le niveau quasi-fermi le long du canal à graphène.

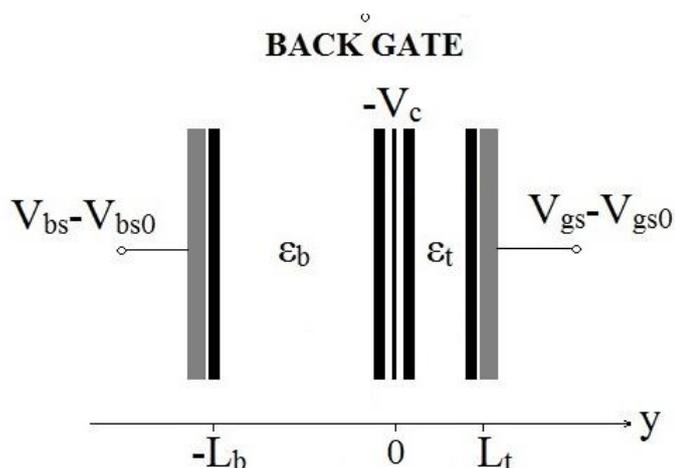


Figure II.11 Schéma du condensateur à base de graphène monocouche montrant les paramètres physiques et électriques, les charges et les potentiels [36].

Les tensions $V_{gs} - V_{gs0}$ et $V_{bs} - V_{bs0}$ sont les sur-tensions entre la grille supérieure et inférieure et la source respectivement. Ils comprennent les différences de fonction de travail entre les grilles et le canal de graphène. La densité de charge nette des porteurs dans le canal est

calculé à partir de la densité des électrons et trous, ces deux paramètres déterminent la capacité quantique C_q , celle-ci est en fonction de la tension des grilles supérieure et inférieure, le potentiel V_c aux bornes de la capacité C_q est connu par le potentiel du canal [37]. Ce potentiel peut être décrit comme [35]

$$V_c(x) = (V_{gs} - V_{gs0} - V(x)) \frac{C_t}{C_t + C_b + \frac{1}{2}C_q} + (V_{bs} - V_{bs0} - V(x)) \frac{C_b}{C_t + C_b + \frac{1}{2}C_q} \dots\dots\dots$$

(II.1)

Les caractéristiques de transconductances et de sortie du dispositif ont été vérifiées vis-à-vis aux résultats expérimentaux [38].

2.5.4.1 Courant du drain :

Ici, nous présentons le modèle de courant du drain. La modulation électrostatique de la concentration des porteurs dans le graphène est obtenue par une configuration à double porte. La source est mise à la terre et résume le potentiel de référence de l'appareil. L'électrostatique de ce dispositif peut être estimé en utilisant le circuit capacitif équivalent. En mode capteur de pH, la capacité C_{EDL} est en série avec la capacité de l'oxyde supérieur C_{OX} formant une capacité globale nommée C_{PH} .

C_q représente la capacité quantique de graphène $C_q = k|V_c|$

Où : $k = (2q^2/\pi)(q/(\hbar v_F)^2)$ et $v_F (= 10^6 \text{ m/s})$ est la vitesse de fermi.

L'expression de C_q est validée sous la condition $qV_c \gg k_B T$

Le potentiel $V(x)$ est la chute de tension dans le canal du graphène, qui est égale à 0, à la fin de source ($x = 0$) et égale à V_{ds} à la fin du drain ($x = L$) comme indiqué auparavant.

La densité globale nette de charge mobile dans le canal du graphène est défini par

$$Q_c = q(p - n) = -(1/2)C_q V_c \tag{II.2}$$

$$V_c(x) = (V_{lg} - V_{lg0} - V(x)) \frac{C_{PH}}{C_{PH} + C_b + \frac{1}{2}C_q} + (V_{bs} - V_{bs0} - V(x)) \frac{C_b}{C_{PH} + C_b + \frac{1}{2}C_q} \tag{II.3}$$

Dont $V_{lg} - V_{lg0}$ et $V_{bs} - V_{bs0}$ sont la tension supérieure de liquide-grille et inférieure de grille-source respectivement. Ces quantités comprennent la différence de travail de sortie entre les grilles et le canal de graphène.

Pour modéliser le courant du drain de GFET, le transport dérive-diffusion est supposé sous la forme

$$I_{ds} = -qW \rho_c(x) v(x) \quad (II.4)$$

$$\text{Et } \rho_c(x) = |Q_c|/q \quad (II.5)$$

$v(x)$ Peut être écrit

$$v = \mu E / (1 + \mu |E| / v_{sat})$$

v_{sat} Est la vitesse de saturation, $v_{sat} = \Omega / \sqrt{\pi \rho_c}$

Appliquant $E = -dV(x)/dx$ puis combinant les expressions ci-dessus pour v et v_{sat} et intégrant l'équation résultante sur la longueur du dispositif, le courant du drain devient

$$I_{ds} = \frac{q\mu W \int_0^{V_{ds}} \rho_c dV}{L + \mu \left| \int_0^{V_{ds}} \frac{1}{v_{sat}} dV \right|}$$

Notant que

$$V_c = \frac{-(C_{PH} + C_b) + \sqrt{(C_{PH} + C_b)^2 \pm 2k[(V_{lg} - V_{lg0} - V)C_{PH} + (V_{bs} - V_{bs0} - V)C_b]}}{\pm k}$$

où le signe positif (négatif) est appliqué quand

$$(V_{lg} - V_{lg0} - V)C_{PH} + (V_{bs} - V_{bs0} - V)C_b > 0 (< 0) \text{ Respectivement.}$$

- Le potentiel du canal au niveau de source V_{cs} est déterminé comme $V_c(V = 0)$

Après plusieurs manipulations mathématiques tout en considérant quelques simplifications[35], nous pouvons obtenir [35]

$$I_{ds} = \left(\frac{\mu * K}{2} \right) * \left(\frac{W}{L_{eff}} \right) * (gV_{cd} - gV_{cs}) \quad (II.6)$$

Tel que :

$$gV_{cs} = \left(\left(-\frac{V_{cs}^3}{3} \right) - \left(\text{sign}(V_{cs}) * \left(\frac{K * (V_{cs}^4)}{4 * CC} \right) \right) \right) \quad (2.6)$$

$$gV_{cd} = \left(\left(-\frac{V_{cd}^3}{3} \right) - \left(\text{sign}(V_{cd}) * \left(\frac{K * (V_{cd}^4)}{4 * CC} \right) \right) \right) \quad (\text{II.7})$$

Avec $CC = C_{PH} + C_b$ et $L_{eff} = L + \mu \text{ abs}(V_{ds}) / v_f$

Pour plus de détails concernant les paramètres utilisés et les étapes de développement du modèle, nous référons à la référence .

2.5.4.2 Effet de la capacité équivalente :

Le modèle le plus utilisé est le modèle de Gouy-Chapman-Stern, qui combine les deux modèles en faisant intervenir la couche dense de Helmholtz (appelée alors couche de Stern) et la couche diffuse de Gouy-Chapman. La couche diffuse commence alors à une distance finie de la paroi.

Les approximations notables de ce modèle sont les suivantes :

- Les ions sont considérés comme des charges ponctuelles.
- Seules les interactions coulombiennes sont significatives.
- La permittivité électrique est constante à l'intérieur de la double couche.
- Le solvant est uniforme à l'échelle atomique.

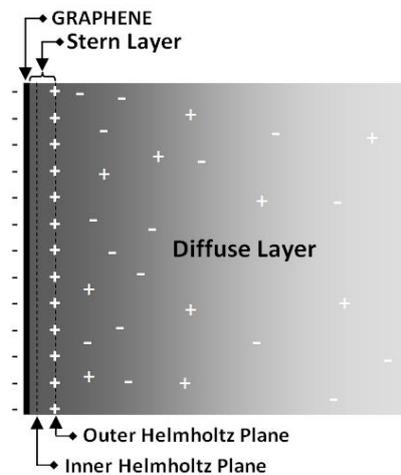


Figure II.12 La Double Couche Electrique formée lors d'un contact métal (graphène)-électrolyte.

Afin de tester le comportement du GFET en mode capteur de pH, nous allons varier la capacité de la double couche électrique tout en traçant la caractéristique de transfert pour chaque valeur de C_{EDL} . Il est à noter que les valeurs de la capacité à double couche électrique sont données sous une forme d'une fonction empirique comme suit

$$C_{EDL} = x * e^{-y} \quad (\text{II.8})$$

Les valeurs de x sont respectivement égale à 2, 4, 5, 7. le I-V obtenu pour ces valeurs est présenté dans les figures suivantes:

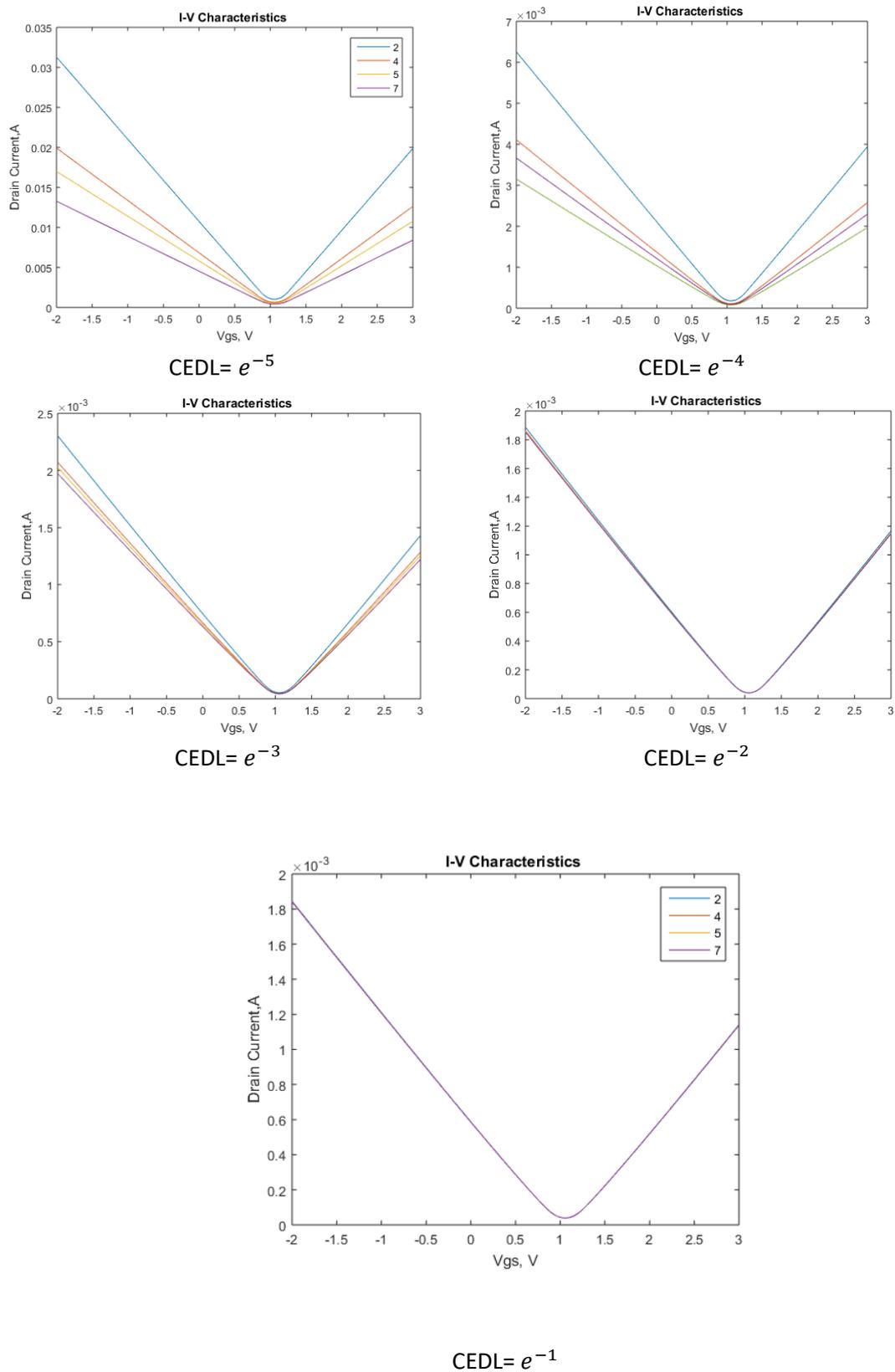


Figure II.13 Caractéristique I_{DS} (A)- V_{GS} (V) pour des différentes valeurs de la Capacité de la double couche électrique.

Paramètres	Valeur
L	10 μ m
W	5 μ m
t _{OXT}	40 nm
t _{OXB}	285 nm
ϵ_{OXT}	21
ϵ_{OXB}	3.9
μ	7500 cm ² /V.s
V _{GS0} (V _{BS0})	0 V
V _{GS}	Varie
V _{DS}	0.1 V

Table II.1. Paramètres de modélisation.

La figure illustre le comportement du dispositif en terme de I_{DS} - V_{GS} en fonction de la capacité effective comportant implicitement l'effet de pH et de la force ionique [35]. La caractéristique de transfert I_{DS} - V_{GS} représente la variation du courant de drain en fonction de la tension de commande de grille sous une polarisation drain source définie. Cette caractérisation est non linéaire d'une répartition d'une « cuvette », qui presque s'annule pour une valeur de $V_{GS}=1$ V (point de Dirac).

L'impact de la variation de la C_{EDL} sur les caractéristiques I_{DS} - V_{GS} du dispositif est claire dans les figures. La diminution de la Capacité C_{EDL} provoque un déplacement du courant minimale I_{DS} (point de Dirac) dans le sens positif (Fig. II.13 en haut à gauche). Nous pouvons observer également que la caractéristique I-V est plus sensible lorsqu'il s'agit d'une variation autour de e^{-5} à e^{-3} F/cm². On peut constater aussi que l'augmentation de la capacité de la double couche électrique augmente le courant du drain sur toute la gamme considérée du V_{GS} .

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un model analytique d'un transistor à effet de champ à canal en graphène. Une capacité sensible aux variations de pH, force ionique, et solution tampon a été incorporée dans le model afin d'étudier préliminairement le comportement du GFET en mode capteur capacitif, où la valeur de pH affecte la capacité globale supérieure. Il est à noter que le model a été implémenté sur la plateforme *Matlab*. Le programme implémenté nous a permis de tracer les caractéristiques I-V en fonction de C_{EDL} qui est en fonction de la valeur de pH et la force ionique selon le concept de la double couche électrique. Une analyse comportementale a été effectuée également et le GFET a manifesté une sensibilité claire à la variation de la capacité de la double couche électrique.

Chapitre III

Chapitre 3

Modélisation analytique d'un capteur de pH à base de GFET

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étendre le model présenté et programmé dans le deuxième chapitre tout en incorporant un sous model de potentiel qui décrit l'impact de pH et la force ionique sur le potentiel au niveau de l'interface oxyde-solution. Pratiquement, la synergie de ce modèle analytique avec le modèle du GFET peut permettre à analyser d'une manière plus avancée le GFET en mode capteur de pH en terme de sensibilité, consommation d'énergie, vitesse...,etc.

3.2 Description du dispositif

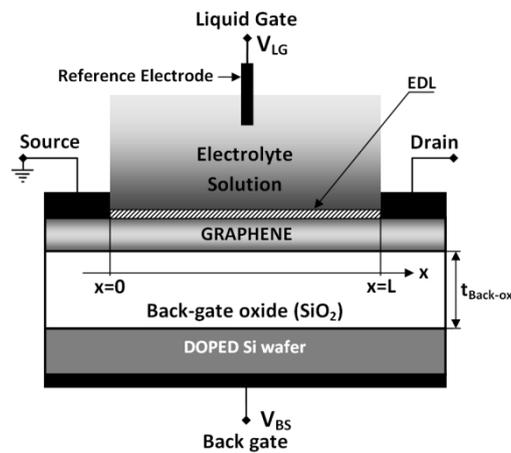


Fig. III.1 Schéma du capteur de pH à base d'IS-GFET

Le modèle est pour le capteur de Ph IS-GFET (Fig. III.1). Il s'agit d'un GFET doté d'un système électrostatique supérieure sensible, qui se compose par une solution aqueuse entre la couche du diélectrique et le contact métallique de la grille. Le courant I_{DS} dépend du changement de potentiel électrostatique de la solution aqueuse attribué au changement des valeurs du mesurande, qui est le pH dans notre cas. La structure de capteur est similaire à celle d'un GFET standard avec une modification au niveau de la partie supérieure.

3.3 Modèle de liaison de site et couche de Stern

Les réactions chimiques génèrent une densité de charge de surface (N_s) à l'interface de l'oxyde de grille et de la solution d'électrolyte, ce qui rend l'ISFET sensible au pH. La formulation par défaut du modèle bien connu de liaison de site a été implémentée. Le tableau III.1 montre les paramètres du modèle de liaison de site pour certaines couches d'oxyde de grille courantes. Pour la caractérisation de la double couche électrique en considérant la capacité bien connue de la couche arrière ($C_{Stern} = 20 \mu F / cm^2$), une épaisseur de couche sévère de 1 nm avec une permittivité relative de 2,25 a été introduite pour fixer une valeur telle que la capacité de la couche sévère soit de $20 \mu F / cm^2$ [43,44].

Oxyde sensible	ϵ_{rel}	pK_a	pK_b	N_s (cm ⁻²)
SiO ₂	3.9	-2	6	5x10 ¹⁴
Si ₃ N ₄	7.5	-2	6	3x10 ¹⁴
Al ₂ O ₃	14	6	10	8x10 ¹⁴
Ta ₂ O ₅	22	2	4	10x10 ¹⁴
HfO ₂	25	7	7	4x10 ¹⁴

Tableau III.1 Valeurs des paramètres utilisées dans le model de liaison de site pour différents oxydes [44].

3.4 Potentiel de la solution d'électrolyte

Lorsque le pH de la solution d'électrolyte est modifié, la baisse potentielle de la solution d'électrolyte change. Par conséquent, l'effet de la solution électrolytique apparaît sur l'appareil en termes de potentiel [43,44], qui est défini comme suit:

$$\psi_0 = -\log_e 10 \times \delta_w \times v_t \times (\text{pH} - \text{pH}_{pzc}) \quad (\text{III.1})$$

où

$$v_t = \frac{kT}{q} \quad \text{and} \quad \delta_w = \frac{\gamma}{1 + \gamma} \quad (\text{III.2})$$

γ est défini avec le modele de Gouy Chapman-stern

$$\gamma = q N_s \frac{\eta}{C_{eq} \times v_t} \quad (\text{III.3})$$

où N_s est la charge de liaison de site (voir tableau III.1)

$$\eta = 2 \times 10^{-\left(\frac{pK_b - pK_a}{2}\right)}, \quad C_W = \frac{C_{DL} \times C_{Stern}}{C_{DL} + C_{Stern}} \quad (\text{III.4})$$

où C_{DL} est la capacité double couche, également appelée couche de Gouy – Chapman et C_{Stern} est la capacité bien connue de la couche arrière [43,44]

$$C_{DL} = \frac{\sqrt{8\epsilon_w v_t q n_0}}{2v_t}, \quad n_0 = N_{avo} i_0 \times 10^{-3} \quad (\text{III.5})$$

$$\text{pH} = -\log\left(\frac{N_V \times 10^3}{N_{avo}}\right) \quad \text{pH}_{pzc} = \left(\frac{pK_a + pK_b}{2}\right) \quad (\text{III.6})$$

Après avoir déterminé le potentiel ψ_0 , ce dernier doit être incorporer dans le model de GFET (présenté dans le chapitre 2). Cela est effectué en utilisant l'expression suivante [1,2]

$$V_{GS\text{-eff}} = V_{GS} + \psi_0 \quad (\text{III.7})$$

Donc, le $V_{GS\text{-eff}}$ remplace le V_{GS} dans le model dérive-diffusion décrit dans le chapitre 2

3.5 Résultats et discussion

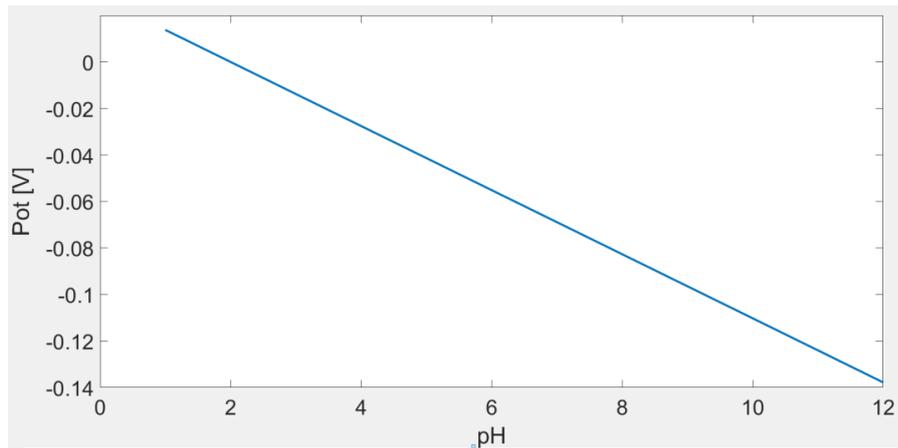


Fig. III.2 ψ_0 en fonction de pH en considérant le SIO₂ comme oxyde supérieur.

La figure III.1 montre le comportement du potentiel au niveau de la surface oxyde-liquide en fonction de la valeur de pH dans la solution. Nous pouvons voir que le potentiel diminue avec l'augmentation de pH. Nous remarquons également que la modulation de potentiel est linéaire.

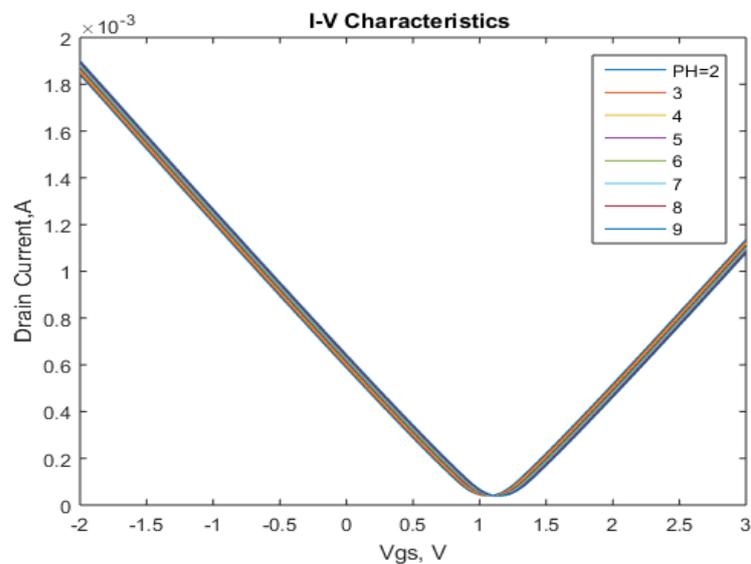


Fig. III.3 I_D - V_G du capteur de pH pour plusieurs valeurs de pH.

La Fig. II.3 montre le comportement de la caractéristique I-V en fonction de la modulation de pH dans la solution électrolytique. Nous pouvons voir que la courbe I-V décale (y compris le point de Dirac) vers la direction positive à chaque incrément de pH (i.e. augmentation de valeur de pH). Il est à noter que ce comportement est enregistré auparavant avec autres types de ISFETs (i.e. basés sur autre matériaux comme canal).

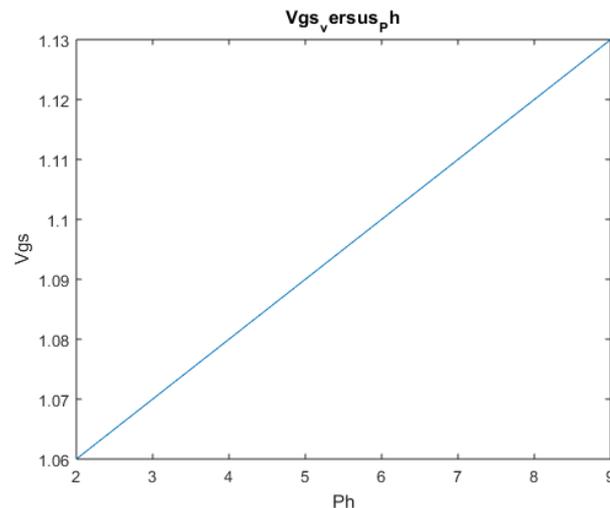


Fig. III.4 $V_{GS-DIRAC}$ pour plusieurs valeur de pH.

La Fig. III.4 montre le comportement de la tension du Dirac en fonction de la modulation de pH dans la solution. Cela peut être considéré comme l'extraction de la tension grille-source au courant du drain minimal. Nous pouvons remarqué que la tension du Dirac augmente avec l'augmentation de pH, ce qui est consistant avec le comportement précédent qui est le décalage de V_{DIRAC} vers la direction positif. Cette caractéristique peut être extrait expérimentalement en utilisant un suiveur de V_{DIRAC} , comme montré dans la figure ci-dessous.

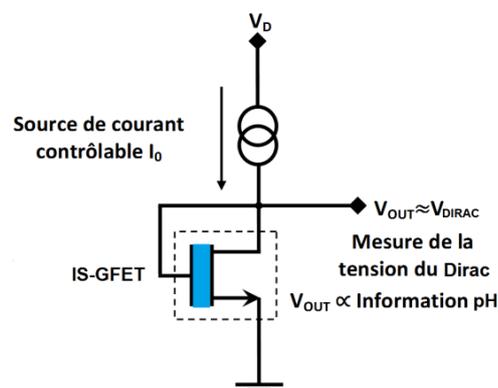


Fig. III.5 Suiveur de la tension du Dirac.

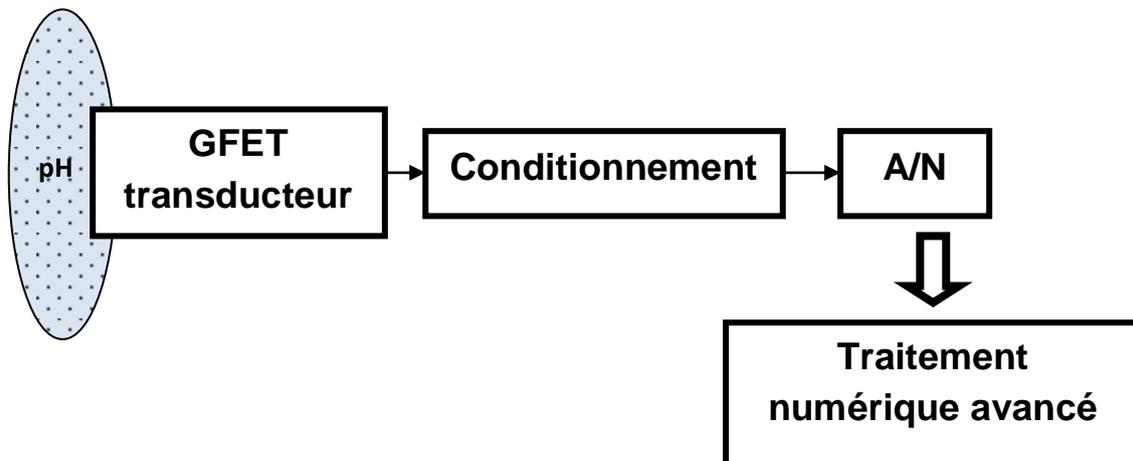


Fig. III.6 Schéma synoptique proposé.

Dans ce circuit de lecteur (*readout circuit*), le courant du drain est fixé à sa valeur minimale caractérisant le point de Dirac. Donc, la tension $V_{GS}=V_{DIRAC}$ est égale à la tension V_{OUT} . Avec un bon calibrage et une définition d'un point initial de pH- V_{OUT} , chaque modulation de pH est reflétée par le V_{OUT} , ou autrement dit, le V_{OUT} est proportionnel au pH. Ce circuit de lecture doit être suivi par une chaîne de mesure avancée à fin de fournir une information précise et stable sur le pH.

Après le conditionnement et la numérisation un traitement numérique avancé peut être appliqué considérant des autres informations fournis par des autres capteurs (par exemple capteur de température) afin de prendre en considération les effets environnementaux qui peut affecter l'information. Par exemple un système correcteur basé sur les réseaux de neurones peut être incorporé (après la réalisation des phases d'entraînement, test, et validation) dans un CI tel que Arduino.

3.6 Instrumentation

Le circuit de lecture de détection de Fig. III.7 détecte la concentration ionique de la solution et le pH avec les caractéristiques du mode de fonctionnement Tension de source constante et courant de drain constant (CVCC) et électrode de référence flottante. Avec cette configuration, deux tensions constantes, par ex. 0,7 et 0,5 V, sont fournis aux deux bornes positives des amplificateurs pour que la borne de drain (D) et la borne de source (S) du transistor ISFET maintiennent une différence de tension drain-source constante de 0,2 V. La résistance (R_{ext}) peut être ajustée pour définir un point athermique pour que l'ISFET batte un courant de drain constant de 50 mA. Pour maintenir et faire fonctionner le dispositif ISFET dans sa région linéaire, la variation de tension grille-source des tensions de seuil d'ISFET doit être directement proportionnelle aux variations des valeurs de pH. La différence de potentiel entre la membrane de détection de grille (G) et l'électrode de référence (Ref) est déterminée par la concentration ionique de la solution [45,46].

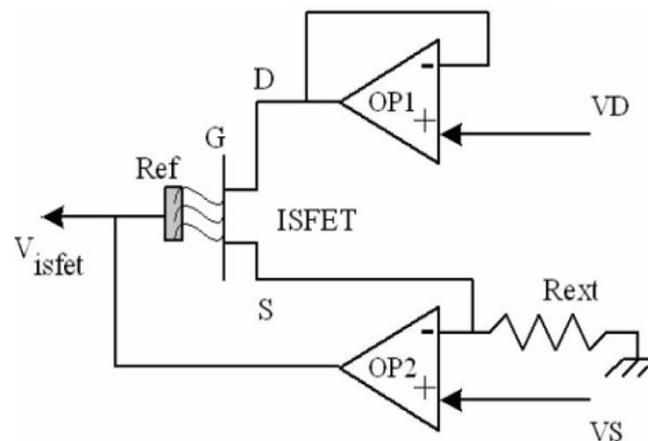


Fig. III.7 circuit de lecture de type CVCC ISFET [3].

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons élargi l'étude de modélisation effectuée dans le chapitre 2 par l'incorporation du modèle de potentiel de surface oxyde-solution dans le modèle du courant de drain du GFET précédant. Le modèle prend en considération la plupart des paramètres électriques, physiques et chimiques qui peuvent influencer le comportement et la performance du capteur de pH à base de GFET. Il a été trouvé que l'incréméntation de pH dans la solution électrolytique cause un décalage du point de Dirac à la direction positif, ce qui est rapporté auparavant dans la littérature. Une extraction de V_{DIRAC} a été effectuée également et le circuit qui peut en faire a également discuté. Nous avons présenté également un circuit de lecture similaire et connu à base d'AOP. Cette étude peut être élargie en intégrant les résultats obtenus dans un simulateur tel que le PSPICE.

Conclusion Générale

Dans ce projet de fin d'étude (PFE), nous avons effectué une modélisation analytique d'un capteur micronique de pH à base de transistor à effet de champ à canal en graphène. La modélisation analytique suivie est basée sur le transport dérive-diffusion, le principe d'effet de champ en conjonction avec une modélisation analytique du potentiel y compris le modèle de Gouy–Chapman Stern. Ce mémoire comporte les concepts et les phénomènes liés aux ISFETs, la physique pertinente, la modélisation, et la discussion analytique des résultats, et perspective sur les circuits de lecture, la compensation, et le traitement intelligent des données.

Dans le premier chapitre nous avons présenté des généralités sur le pH, sa détection, l'implication de sa mesure, les capteurs de pH, et les ISFETs. Ce chapitre nous a permis non seulement d'effectuer une étude bibliographique profonde, mais aussi d'avoir des connaissances très importantes sur la physique des phénomènes pertinents.

Le début du deuxième chapitre a été consacré pour la définition du graphène, ses propriétés, une brève description sur sa physique, et les raisons de son choix comme canal de FET en mode capteur. Nous avons ensuite présenté un modèle analytique du transistor à effet de champ à canal de graphène, qui est basé sur le transport dérive-diffusion. Puis nous avons modélisé un capteur chimique à base de GFET en considérant une capacité sensible aux mesurandes chimiques. Les caractéristiques I-V du capteur ont été extraites et discutées en conséquence.

Dans le chapitre trois qui est une extension du deuxième chapitre, nous avons élargi le modèle du GFET en se basant sur des concepts confirmés pour modéliser un capteur micronique de pH à base de GFET. Le comportement de ce dernier a été étudié et analysé en assumant un environnement électrolytique dynamique. En suite, nous avons proposé et discuté des circuits de lecture qui peuvent servir au commencement d'une chaîne de mesure. Nous avons terminé le chapitre par des perspectives.

Ce mémoire peut être considéré comme un point de départ d'une recherche théorique approfondie, où des modèles numériques et analytiques compactes et précises, qui peuvent prédire le comportement expérimental des capteurs, doivent être développés pour paver la route à l'élaboration, l'expérimentation, la maîtrise technologique, et l'industrie.

Bibliographies :

- [1] **barka, noureddine.** *diplome s'études supérieures appliqués de chimie*. Agadir : université Ibn zohr , 2004.
- [2] **noomene, hamza.** *Master de recherche de l'environnement " aménagement et risques "*. Manouba : facultés des lettres Arts et Humanités , 2011.
- [3] **Hakimi, Abdellatif.** Oran : université de technologie licence , 2004.
- [4] **Danel, Pr vincent.** Grenoble : université de grenoble Alpes dernières .
- [5] **Sorensen.** *Etymol et Hist (compte rendu des travaux)*. s.l. : laboratoire de carlberg , 1909. vol 8 .
- [6] **Abderrahmane, CHEREIT.** *Etude des propriétés des transistors q effet de champ effet GaAs*. oum el bouaghi : faculté des sciences exactes et des sciences de la nature et de la vie université larbi ben m'hidi, 11 juillet 2010 .
- [7] **K.Zeghdar.** *Simulation des caractéristiques courant tension d'une diode Schottky en phosphore d'indium InP*. Biskra : thèse magister université de Biskra, 2014.
- [8] **Huff, Howard R.** *Into The Nano Era Moore's Law Beyond Planar Silicon CMOS*. Berlin : springer édition, 2009.
- [9] **Rachida, TALMAT.** *Etude des phénomènes de transport de porteurs et du bruit basse fréquence* . Normandie : université de caen basse , 2006.
- [10] **P.Bergveld.** Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurements. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*. 1970, Vol. BME-17, 70–71.
- [11] **C Toumazou, P Georgiou and P Bergveld.** 40 years of ISFET technology: From neuronal sensing to DNA sequencing *ELECTRONICS LETTERS*. 2011, Vol. 47(26), S7-12.
- [12] **P Bergveld, A V D Berg, P D V D Wal, M Skowronska-Ptasinska, E J R Sudhölter and D N Reinhoudt.** How electrical and chemical requirements for refets may coincide *Sensors& Actuators*. 1989, Vol. 18(3), 309-27.
- [13] **S Sorgenfrei, C Chiu, R L Gonzalez, Y J Yu, P Kim, C Nuckolls and K L Shepard.** Label free single-molecule detection of DNA hybridization kinetics with a carbon nanotube field effect transistors . *Nat. Nanotechnol.* Vol. 6, 126-32.
- [14] **Y L Bunimovich, Y S Shin, W Yeo, M Amori, G Kwong and J R. Heath** Quantitative Real-Time Measurements of DNA Hybridization with Alkylated Non-Oxidized Silicon Nanowires in Electrolyte Solution. *J. Am. Chem. Soc.* 2006, Vol. 128(50), 16323-31.
- [15] **E Stern, A Vacic, N K. Rajan, J M Criscione, J Park, B R Ilic, D J Mooney, M A Reed and T M Fahmy.** Label-free biomarker detection from whole blood. *Nat. Nanotechnol.* 2010, Vol. 5(2), 138-42.
- [16] **E Stern, J F Klemic, D A Routenberg, P N Wyrembak, D B Turner-Evans, A D Hamilton, D A Lavan, T M Fahmy and M A Reed.** Label-free immunodetection with CMOS compatible Semiconducting Nanowire. 2007, Vol. 455, 519-22.

- [17] **J Chou, T Cheng, G Ye, Y Liao, S Yang and H Chou.** Fabrication and Investigation of Arrayed Glucose Biosensor Based on Microfluidic Framework. *IEEE Sens. J.* 2013, Vol. 13(11), 4180-87.
- [18] **J Noh, S Park, H Boo, H C Kim and T D Chung.** Nanoporous platinum solid-state reference electrode with layer-by-layer polyelectrolyte junction for pH sensing chip. *lab chip.* 2011, Vol. 11(4), 664-71.
- [19] **Cédric AYELA.** *Micromembranes résonantes à actionnement et détection piézoélectriques intégrés pour la détection de molécules biologiques en temps réel.* s.l. : thèse de doctorat, Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2007.
- [20] *ISFETs theory and practice* . **p.Belvgerd.** toronto : IEEE sensor , 2003.
- [21] **H.Abe, M.Essahi and T.Matsuo.** ISFETs using inorganic gate thin films. *IEEE Trans on electron devices* . 26, 1930-1944 .
- [22] **B.Pallon.** *conception de microcapteur PH-ISFET faible bruit* . tima grenoble : université de grenoble, 1998.
- [23] **I.MESSAOUDENE L.HAMMADOU,** Université Mohammed Seddik BENYAHIA – Jijel – Faculté des Sciences et de la Technologie « Modélisation analytique du GFET », Année universitaire : 2018/2019.
- [24] **Jorge Daniel Aguirre Morales,** ÉCOLE DOCTORALE de Sciences Physiques et de l'Ingénieur-SPÉCIALITÉ Électronique « Characterization and Modeling of Graphene-based Transistors towards High Frequency Circuit Applications », Soutenue le 17 Novembre 2016.
- [25] **Antonio Tejada, Amina Taleb-Ibrahimi, et Claire Berger** « Les propriétés du graphène ".
- [26] **Jean-Noël Fuchs, Mark Oliver Goerbig, et Bernard Plaçais,** « Le graphène-Quand la mécanique quantique rencontre la relativité dans un trait de crayon », Reflets de la Physique n° 25.
- [27] **François Varchon,** l'Institut Néel, département MCMF, équipe TSNPE, CNRS/UJF, Grenoble., « Propriétés électroniques et structurales du graphène sur carbure de silicium », le 08 décembre 2008.
- [28] **Jean-Marie Poumirol,** école doctorale, science de la matière (INSA Toulouse), « Étude des propriétés électroniques du graphène et des matériaux à base de graphène sous champs magnétiques intenses », 22 juillet 2011.
- [29] **Kosuke Nagashio,** Department of Materials Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan, and PRESTO, Japan Science and Technology Agency (JST), Tokyo 113-8656, Japan (Received 6 June 2016 et 2016), accepted 8 September.
- [30] **Gilles Montabaux,** courses de Laboratoire de Physique des Solides, Orsay, France « Introduction to Graphène Physics », August 3-18, 2013.
- [31] **Gilles Montabaux,** petite classe physique de solides-Orsay, structure de bande du graphène, le 11 octobre 2005.

[32] **Mele David**, école doctorale, science pour l'ingénieur, micro et nanotechnologies, acoustique et télécommunications, « développement de dispositifs à base de graphène pour des applications hautes fréquences », le 26 mai 2014.

[33] <https://www.graphenea.com/pages/graphene-supercapacitors#.Xz1RBvHVLIU>. [En ligne]

[34] **El ghoul Tarek, Najari mountassir, Mehdi akermi et El mir lessad**, Graphene Field-Effect Transistor for pH Sensing application : compact modeling and simulation study, University of Gabes.

[35] **David jeminéz**, IEEE Explicit Drain current charge and capacitance model of graphene field effect transistor, university autonoma of barcelona, spain, 2011.

[36] **Francisco Pasadas and David Jiménez**, Large Signal Model of Graphene Field Effect Transistors Part I: Compact Modeling of GFET Intrinsic Capacitances.

[37] **Sudipta Bardhan, Manodipan Sahoo & Hafizur Rahaman** (2019): Empirical Drain Current Model of Graphene Field-Effect Transistor for Application as a Circuit Simulation Tool, IETE Journal of Research, DOI: 10.1080/03772063.2019.1620639.

[38] **Sudipta Bardhan, Manodipan Sahoo et Hafizur Rahaman**, Boltzmann transport equation-based semiclassical drain current model for bilayer GFET including scattering effects, Indian Institute of Engineering Science and Technology, 2018.

[39] **S.Z.Sze**. Physics of Semiconductors Devices. Wiley, New York. 2ème édition, 1982.

[40] **Bousse, Luc**. single electrode potentials related to flatband voltage measurement on EOS and MOS structures. *J.Chem.Phys.* 1982, Vol. 76, 10.

[41] **Kamel, IBERRAKEN Massinissa et MAOUCHEK**. *contrôle de qualité et analyse*. s.l. : université de Béjaïa, 2006.

[42] **Wenga, GERTUDE**. *Mise en œuvre d'un capteur chimique et biologique à base de nanofils de silicium*. Rennes : institut de l'électronique et de la télécommunication universités de Rennes, 09 décembre 2013.

[43] **Piyush Dak and Muhammad Ashraf Alam**, FET pH Sensor Model Version 1.0.1, Purdue University West Lafayette, IN 47907 Last Updated: May 19, 2015.

[44] **R Narang, M Saxena, M Gupta**, Analytical model of pH sensing characteristics of junctionless silicon on insulator ISFET, *IEEE Transactions on Electron Devices* 64 (4), 1742-1750.

[45] **W.-Y. Chung, C.-H. Yang, Y.-F. Wang, Y.-J. Chan, W. Torbicz, and D. G. Pijanowska**, "A signal processing ASIC for ISFET-based chemical sensors," *Microelectronics Journal*, vol. 35, no. 8, pp. 667–675, Aug. 2004.

[46] **BOUDJENIFA Bahia**, mémoire magister, Modélisation d'un ISFET, université de batna 2, 2016.

ملخص

يبحث هذا العمل في مستشعر الأس الهيدروجيني المعتمد على الترانزستور الحقلية القائم على الجرافين (GFET) باستخدام نهج النمذجة التحليلية. في الفصل الأول، قدمنا عموميات على الأس الهيدروجيني، أجهزة استشعار الأس الهيدروجيني، وتطبيقات استشعار الأس الهيدروجيني. في الفصل الثاني، قدمنا ونفذنا في منصة Matlab نموذجًا تحليليًا يعتمد على النقل الانجراف-الانتشار ومبدأ التأثير الميداني من أجل التحليل الأولي لترانزستور حقلية قائم على الجرافين كمستشعر كيميائي. أظهرت نتائج النمذجة أنه يمكن استخدام GFET بشكل فعال كمستشعر كيميائي مع مراعاة تيار التصريف أو نقطة ديراك كمقاييس للاستشعار. في الفصل الثالث، تم أيضًا تقديم نموذج الكمون الذي يصف رياضياً الواجهة أكسيد - محلول وبرمجته في Matlab. بالإضافة إلى ذلك، تم استخدامه بالاقتران مع نموذج GFET أعلاه والمفاهيم ذات الصلة للتحقيق في مستشعر الأس الهيدروجيني المستند إلى GFET. تم دراسة هذا الأخير من حيث استشعار السلوك والحساسية. الجزء الأخير من عملنا هو استنتاج مبني على النتائج التي تم الحصول عليها. يمكن أن توفر هذه الدراسة نقطة انطلاق لمزيد من البحث والتحليل.

الكلمات الدالة: الأس الهيدروجيني، الترانزستور الحقلية القائم على الجرافين، أجهزة الاستشعار، النمذجة التحليلية.

Abstract

This work investigates a pH sensor based on graphene field-effect transistor (GFET) using an analytical modeling approach. In the first chapter, we gave a generality on the measurand (pH), pH sensors, and the pH sensing applications. In the second chapter, we have introduced and implemented in Matlab software an analytical model based on drift-diffusion transport and field-effect principle in order to preliminary analyze the GFET as chemical sensor. The modeling results have shown that the GFET can be effectively employed as chemical sensor while considering the drain current or Dirac point as sensing metrics. In the third chapter, a potential model describing the potential at solution-oxide interface has also been presented and programmed in Matlab. In addition, it has been used in conjunction with the above GFET model and the relevant concepts to investigate a GFET-based pH sensor. This latter has been investigated in terms of sensing behavior and sensitivity. The last part of our work is a conclusion based on the obtained results. This study can provide a starting point for deeper investigation and analysis.

Keywords: pH, Graphene FET, sensors, analytical modeling.

Résumé

Ce travail étudie un capteur de pH basé sur un transistor à effet de champ en graphène (GFET) en utilisant une approche de modélisation analytique. Dans le premier chapitre, nous avons donné une généralité sur le mesurande (pH), les capteurs de pH et les applications de détection de pH. Dans le deuxième chapitre, nous avons introduit et implémenté dans le logiciel Matlab un modèle analytique basé sur le transport dérive-diffusion et le principe d'effet de champ afin d'analyser préliminairement le GFET comme capteur chimique. Les résultats de la modélisation ont montré que le GFET peut être utilisé efficacement comme un capteur chimique tout en considérant le courant de drain ou le point Dirac comme des mesures de détection. Dans le troisième chapitre, un modèle de potentiel décrivant le potentiel à l'interface solution-oxyde a également été présenté et programmé dans Matlab. En outre, il a été utilisé en conjonction avec le modèle GFET précité et les concepts pertinents pour étudier un capteur de pH basé sur GFET. Ce dernier a été étudié en termes de comportement de détection et de sensibilité. La dernière partie de notre travail est une conclusion basée sur les résultats obtenus. Cette étude peut fournir un point de départ pour une étude et une analyse plus approfondies.

Mots clés: pH, Graphène FET, capteurs, modélisation analytique.

Cette page a été laissée intentionnellement blanche