

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université 8 Mai 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 Gaz à Base  
de Transistor à Effet de Champ**

---

Présenté par :

-----  
**Grini Riyane**  
-----

Sous la direction de :

**Dr. Khalil Tamersit**

Jun 2022

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université 8 Mai 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 Gaz à Base  
de Transistor à Effet de Champ**

---

Présenté par :

-----  
**Grini Riyane**  
-----

Sous la direction de :

**Dr. Khalil Tamersit**

Jun 2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*Cette page a été laissée intentionnellement blanche*

# Dédicace

- Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, pour leur soutien, leur encouragement et leur amour.
- Je dédie aussi ce modeste travail à ma famille, mes amis, mes collègues et mon pays.

**Grini Riyane**

# Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon dieu pour tout. Je remercie *Allah* qui m'a tout donné pour atteindre ce stade.

Je remercie vivement les membres de jury pour leur disponibilité et l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à mon travail.

J'exprime la profonde gratitude à mon encadrant, Dr. Khalil Tamersit, qui a rendu tout le travail possible.

Je tiens aussi à manifester mon affection à ma famille qui m'a soutenu tout au long de mon travail.

Finalement, je remercie mes amis, mes collègues et toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

**Grini Riyane**

## Liste des figures

• Figure I.1 principe de détection de gaz par IR [3].....	10
• Figure I.2 Conductivité thermique pour l'analyse des gaz.....	11
• Figure I.3 Exemple de capteur à base d'oxyde métallique (Figaro TGS®).....	11
• Figure I.4 Schéma d'un capteur électrochimique [6].....	12
• Figure I.5 : Canal vide: courant nul.....	14
• Figure I.6 : Canal rempli: courant non nul [14].....	14
• Figure I.7 structures et symboles des transistors MOSFET.....	15
• Figure I.8 (a) Schéma de principe d'un MOSFET conventionnel et définition des termes.(b) Représentation de la vue en trois dimensions du MOSFET.....	16
• Figure I.9 Comparaison entre les réponses de la fonction de travail des couches conductrices de polymère à différentes vapeurs [10].....	17
• Figure I.10 Transistor à effet de champ en mode capteur de gaz basé sur la modulation de travail de sortie de la grille via le mesurande (i.e. gaz dans notre cas) [10].....	17
• Fig. II. 1 la feuille de Graphene (monocouche).....	20
• Fig. II. 2 Différent types de capteur de gaz à base de GFET.....	21
• Figure II.3 (a) structure de GFET, (b) Schéma du modèle capacitif d'un GFET..... [14,15].....	22
• Figure II.4 GFET en mode capteur de gaz à base de modulation de travail de sortie de la grille.....	23
• Figure II.5 Comparaison du model utilisé et les données expérimentales disponibles dans la littérature.....	26
• Fig. III.1 (a) Représentation de GFET avec grille supérieure [16]. (b) Réalisation expérimentale d'un dispositif similaire [16].....	29
• Fig. III.2 la caractéristique IDS-VGS du dispositif GFET pour plusieurs valeurs de VDS.....	30
• Fig. III.3 La caractéristique $I_{DS}-V_{GS}$ du GFET en mode capteur pour plusieurs valeurs de différence en travail de sortie $\Delta WF$ . $V_{DS}= 0.1 V$ .....	31
• Fig. III.4 La sensibilité en fonction de la tension $V_{GS}$ pour plusieurs valeur de $\Delta WF$ considérant $V_{DS}= 0.1 V$ .....	32
• Fig. III.5 Le maximum de la sensibilité en fonction du changement de travail de sortie pour deux valeurs différentes de $V_{DS}$ .....	33
• Fig. III.6 Le maximum de la sensibilité en fonction du changement de travail de sortie pour trois valeurs différentes de $\rho_{0A}= 0.3.10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , $\rho_{0B}= 3.10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , $\rho_{0C}= 3.10^{12} \text{ cm}^{-2}$ .....	34
• Fig. III.7 Les circuits de lecture possible pour le capteur de gaz sous l'étude. (a) Suiveur de point de Dirac (b) Traceur de caractéristique de transfert.....	35
• Fig. III.8 Imagination d'une chaine de mesure éventuelle pour une implémentation dans une librairie de simulation.....	36

## Sommaire

Introduction générale.....	6
<b>Chapitre 1.Généralité sur Les capteurs de gaz</b>	
I.1 Introduction.....	7
I.2 Rappel des principales caractéristiques des capteurs de Gaz.....	8
I.2.1 Sensibilité.....	8
I.2.2 Sélectivité.....	8
I.2.3 Stabilité.....	8
I.2.4 Réversibilité.....	9
I.2.5 Temps de réponse et de recouvrement.....	9
I.3 Types de capteurs de gaz.....	9
I.3.1 Capteurs de gaz infrarouges.....	9
I.3.2 Capteurs de gaz à conductivité thermique.....	10
I.3.3 Capteurs de gaz à oxyde métallique.....	11
I.3.4 Capteurs de gaz électrochimiques.....	12
I.3.5 Capteurs de gaz à base de transistor à effet de champ (modulation de travail de sortie	12
I.3.5.a Les transistors à effet de champs.....	12
I.3.5.b Le transistor MOSFET.....	13
I.3.5.c Principe de base d'un transistor MOSFET.....	13
I.3.5.d Principe de fonctionnement.....	15
I.3.5.e Architecture générale du transistor MOSFET.....	15
I.3.5.f Définition du travail de sortie.....	16
I.3.5.g Interaction gaz-métal sensible en terme de modulation de travail de sortie.....	16
I.4 Conclusion.....	18
<b>Chapitre2 : Modélisation analytique d'un capteur gaz à base de GFET</b>	
II.1 Introduction.....	19
II.2 le graphène.....	20
II.3 Les capteurs de gaz à base de GFET.....	21
II.3 Modélisation analytique.....	22



II.3.1 Concept du circuit capacitif.....	22
II.3.2 Courant du drain.....	23
II.4 Conclusion.....	26

**Chapitre III : Evaluation de performance du capteur de gaz à base de GFET**

III.1 Introduction.....	28
III.2 Etude, analyse, et évaluation du capteur.....	29
III.3 Conclusion.....	36
Conclusion générale .....	37
Références.....	39
Résumé.....	40

## Introduction générale

La détection et la surveillance de gaz est une opération clé dans plusieurs domaines tels que la sécurité, la défense, la médecine, l'industrie, l'environnement, et même la recherche scientifique fondamentale. C'est pour cela un effort de recherche considérable est focalisé sur l'amélioration des systèmes et des composants de détection ou l'invention et la proposition de nouveaux paradigmes en la matière. Pratiquement, la chaîne technologique commence par l'évaluation théorique de nouveaux composants et systèmes (prévus à surmonter leurs prédécesseurs) via la procédure de modélisation et de la simulation. Cette dernière est une étape indispensable qui permet non seulement l'évaluation de performance d'un nouveaux composants innovants, mais aussi de paver la route à une fabrication et industrie optimisée. Le commencement par une modélisation analytique rigoureuse est bénéfique à plus d'un titre y compris la prédiction du comportement du capteur sans consommer ni le temps ni le budget qui forment une préoccupation majeure. Le premier composant dans une chaîne de mesure qui sert à détecter le gaz en fournissant une information électrique est le capteur. Le développement de ce dernier peut toucher plusieurs volets tels que l'élargissement de la limite de détection, la surveillance à faible consommation d'énergie, et la détection à haute sensibilité et sélectivité. Dans cette optique, nous allons évaluer via la modélisation analytique dans ce PFE, un capteur de gaz miniaturisé, basé sur le transistor à effet de champ à canal en graphène. Pour faire cela, nous avons adopté un modèle analytique basé sur le transport dérive-diffusion en conjonction avec le modèle à effet de champs tout en incorporant l'effet de gaz dans la tension de grille effective. Cette étude peut fournir une perspective analytique et une base physique pour une simulation avancée ou une élaboration éventuelle.

# Chapitre I

## Généralités sur Les capteurs de gaz

### I.1 Introduction

Les capteurs de gaz sont des appareils qui nous aident à savoir et comprendre la quantité de gaz dans l'environnement et l'état naturel de son mouvement. Les capteurs de gaz révèlent la quantité de gaz dans l'environnement et la nature de la composition du gaz avec des signaux électriques et peuvent fournir son changement. Les paramètres à prendre en compte lors de la création de capteurs de gaz sont les suivants : le type de gaz à détecter, sa concentration et l'environnement dans lequel se trouve le gaz. Dans ce chapitre nous allons présenter les capteurs de gaz les plus répondus dans la littérature en soulignant plus particulièrement ceux basés sur les transistors à effet de champ.

## **I.2 Rappel des principales caractéristiques des capteurs de Gaz**

Les performances d'un capteur de gaz s'évaluent grâce à ses six principales caractéristiques : les 3 « S » : Sensibilité, Sélectivité et Stabilité mais aussi la réversibilité, le temps de réponse et la reproductibilité. Ce sont ces performances que nous tentons de caractériser tout au long de notre étude même si les 3 « S » seront toujours les plus importantes dans un premier temps [0].

### **I.2.1 Sensibilité**

La sensibilité est un paramètre qui exprime la variation de la réponse du capteur en fonction de la variation du mesurande (concentration de gaz). Un capteur de gaz est dit sensible si une petite variation de concentration entraîne une importante variation du signal de sortie [0].

### **I.2.2 Sélectivité**

Elle est définie généralement comme le rapport de la sensibilité d'un gaz sur la sensibilité d'un autre gaz pour des concentrations données. Un capteur est sélectif si sa sensibilité à un gaz est très peu affectée par la présence d'autres gaz (dits interférents) [0].

### **I.2.3 Stabilité**

Un capteur est dit stable quand, pour des conditions fixes, il fournit une valeur de ligne de base constante. Autrement dit, la notion de manque de stabilité est associée aux dérives du capteur au cours du temps. Il y a la dérive de « l'offset » (dérive de réponse sous air ou gaz référent constant) et la dérive de la sensibilité à un gaz donné. Cette dérive peut provenir aussi bien du capteur lui-même (problème de réversibilité) que des conditions ambiantes à laquelle est réalisée l'expérience [0].

### **I.2.4 Réversibilité**

Elle définit la capacité du capteur à revenir à son état initial lorsqu'on supprime l'excitation gazeuse. Dans ce cas, nous devons, dans toutes nos expériences, vérifier cette réversibilité car dans le cas contraire nous parlons d'empoisonnement du capteur [0].

### **I.2.5 Temps de réponse et de recouvrement**

Il s'agit de quantifier le temps que met le capteur à réagir à un évènement (temps de réponse) et le temps mis pour revenir dans la configuration initiale une fois l'évènement disparu (temps de recouvrement) [0].

## **I.3 Types de capteurs de gaz**

Il existe de nombreux types de capteurs pour mesurer différents paramètres. Les capteurs de gaz sont généralement classés en différents types en fonction du type d'élément de détection avec lequel ils sont construits. Parmi les capteurs de gaz es plus réponsus dans la littérature nous citons :

- Capteurs de gaz infrarouges.
- Capteurs de gaz à conductivité thermique.
- Capteurs de gaz à oxyde métallique.
- Capteurs de gaz électrochimiques.
- Capteurs de gaz à base de transistor à effet de champ (modulation de travail de sortie).

### **I.3.1 Capteurs de gaz infrarouges**

Le capteur émet un faisceau infrarouge, dont la longueur d'onde est définie en fonction du gaz ciblé. Lorsque ce gaz passe devant le faisceau, il va absorber une partie de son

rayonnement. L'intensité mesurée va baisser. Celle-ci est comparée à une intensité de référence pour permettre d'établir une concentration. Comme aucune réaction chimique n'entre en jeu, les capteurs infrarouges ne connaissent pas de problèmes de saturation et ne sont pas influencés par la concentration d'oxygène. En cas de dysfonctionnement, l'intensité du faisceau diminue, ce qui est interprété par le détecteur comme une présence de gaz [1].

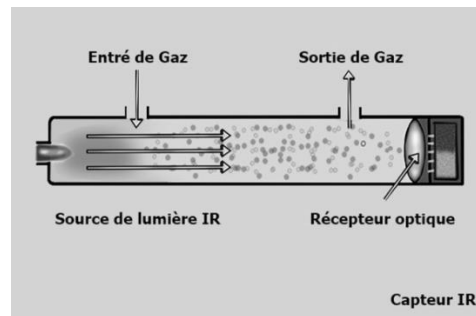


Figure I.1 principe de détection de gaz par IR [3]

### I.3.2 Capteurs de gaz à conductivité thermique

L'analyseur de conductivité thermique utilise la propriété de conductivité thermique (TC), ce qui correspond à la capacité des gaz à conduire la chaleur, chaque gaz a une valeur TC différente. L'analyseur utilise cette propriété pour mesurer un gaz dans un autre échantillon binaire ou un mélange pseudo-binaire.

L'analyseur utilise une paire de thermistances dans une configuration de pont de Wheatstone. L'une des thermistances se trouve dans la cellule d'échantillonnage tandis que l'autre est dans une chambre de référence scellée. Lorsque le gaz pénètre dans la cellule d'échantillonnage, la chaleur est transmise à la thermistance et déséquilibre le circuit de pont. Un courant est nécessaire pour maintenir le pont équilibré et, à partir de cela, la valeur TC du gaz peut être déterminée et consécutivement la proportion du gaz dans un échantillon [2].

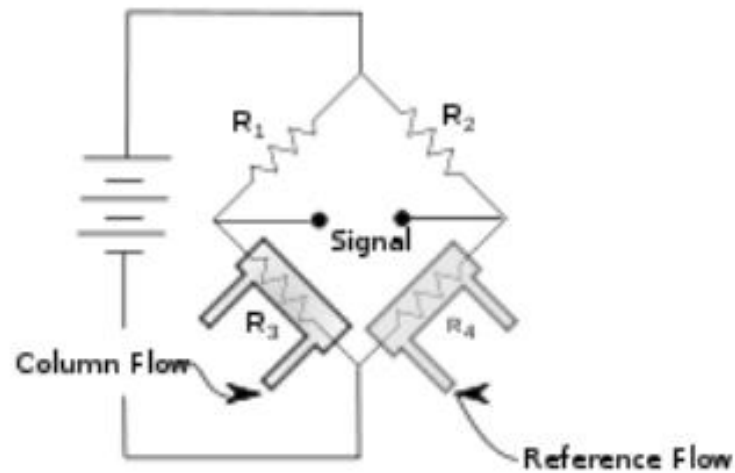


Figure I.2 Conductivité thermique pour l'analyse des gaz

### I.3.3 Capteurs de gaz à oxyde métallique

Les capteurs de gaz à oxydes métalliques sont des capteurs passifs dont les variations ne sont mesurables qu'en intégrant le capteur dans un circuit de conditionnement (montage potentiométrique, pont de Wheatstone, ...). La variation du milieu ambiant (ou de la concentration d'un gaz) induit une variation de conductivité du matériau sensible à base d'oxydes métalliques semiconducteurs.

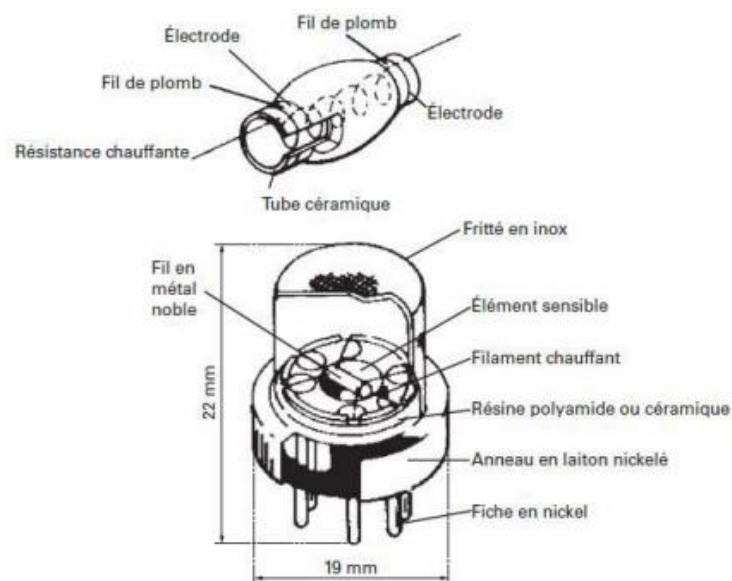


Figure I.3 Exemple de capteur à base d'oxyde métallique (Figaro TGS®).

### I.3.4 Capteurs de gaz électrochimiques

Les capteurs de gaz électrochimiques sélectifs permettent de détecter la plupart des gaz toxiques classiques, tels que le CO, le H<sub>2</sub>S, le Cl<sub>2</sub>, le SO<sub>2</sub>, dans de nombreuses applications. Les capteurs électrochimiques sont compacts, requièrent peu d'énergie et procurent une excellente linéarité et constance. Ils bénéficient en outre d'une longue durée de vie (généralement 3 ans). Les temps de réponse, notés T<sub>90</sub> (c'est-à-dire le temps pour atteindre 90 % de la réponse finale), sont habituellement de 30 à 60 secondes. Ces capteurs offrent par ailleurs des plages de détection de 0,02 à 50 ppm selon le type de gaz cible [5].

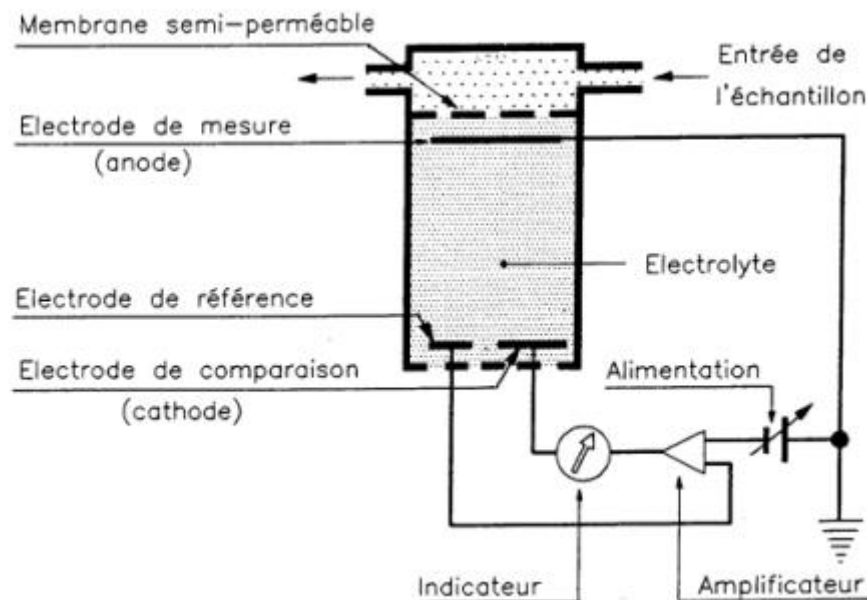


Figure I.4 Schéma d'un capteur électrochimique [6]

### I.3.5 Capteurs de gaz à base de transistor à effet de champ (modulation de travail de sortie)

#### I.3.5.a 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].

### **I.3.5.b Le transistor MOSFET**

La découverte des propriétés semi-conductrices de certains matériaux au 17ème 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.

### **I.3.5.c 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

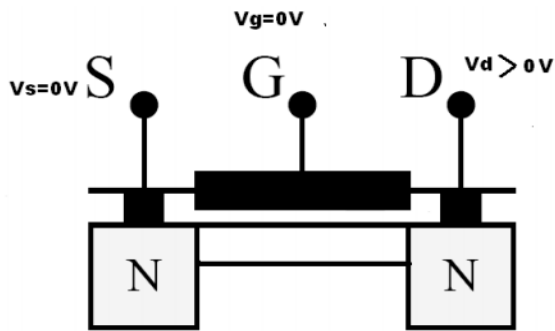


Figure I.5 : Canal vide: courant nul

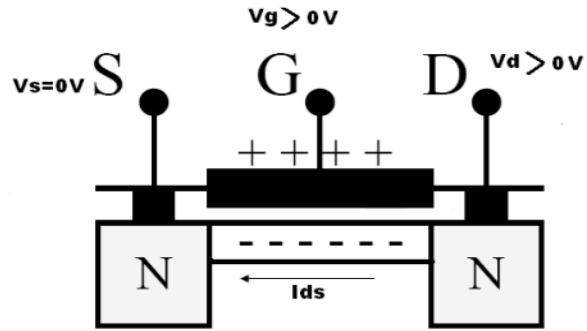


Figure I.6 : Canal rempli: courant non nul [14]

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 1.5 et 1.6 illustrent 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  $N_A$ , 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:

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

Et

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

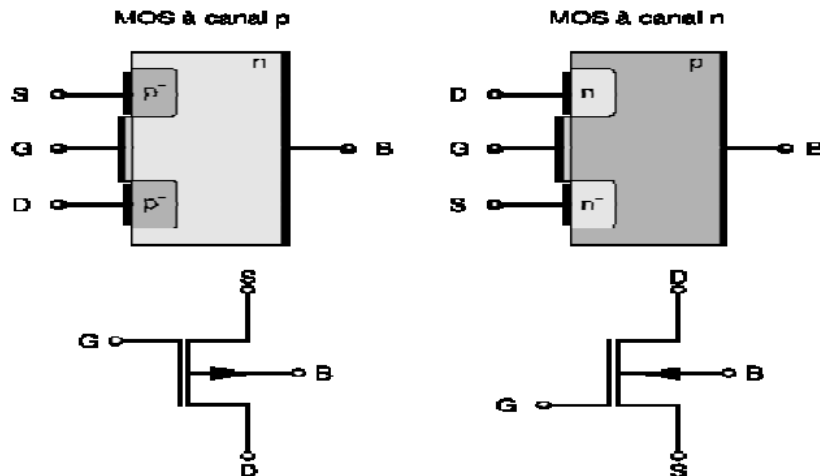


Figure I.7 structures et symboles des transistors MOSFET.

### I.3.5.d 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.7). 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).

### I.3.5.e 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.8). Ses dimensions caractéristiques sont :

$L_g$  : la longueur de la grille du transistor ;  
 $L$  : la longueur électrique du canal du transistor ;  
 $\Delta L$  : 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.

### I.3.5.f Définition du travail de sortie

En physique, en mécanique quantique, le travail de sortie ou travail d'extraction<sup>1,2</sup> est l'énergie minimum, mesurée en électron-volts, nécessaire pour arracher un électron depuis le niveau de Fermi d'un métal jusqu'à un point situé à l'infini en dehors du métal (niveau du vide) [9].

### I.3.5.g Interaction gaz-métal sensible en terme de modulation de travail de sortie

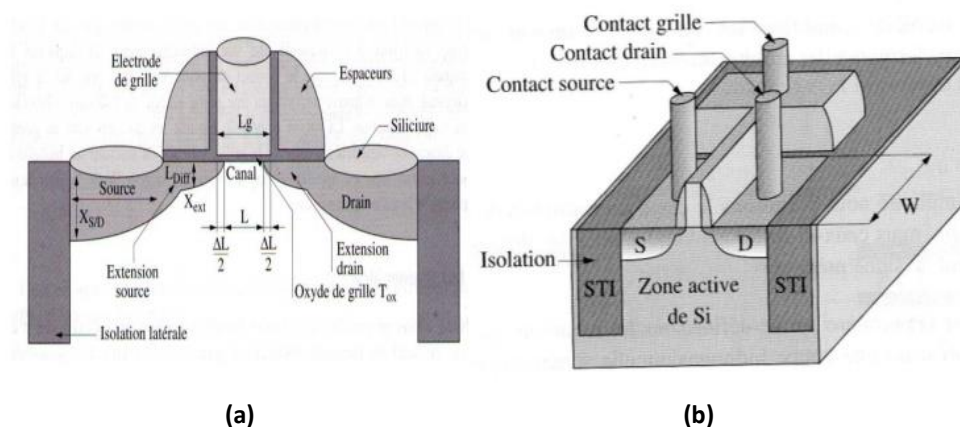


Figure I.8 (a) Schéma de principe d'un MOSFET conventionnel et définition des termes.(b) Représentation de la vue en trois dimensions du MOSFET

Il existe des métaux et des semi-conducteurs qui peuvent être utilisés comme des grilles sensibles (tels que les polymères conducteurs [10]) afin d'opérer le transistor à effet de champ comme capteur de gaz. Le principe de détection repose sur la modulation de travail de sortie causée par l'introduction du gaz (mesurande) comme montré dans la figure 9. Ce changement de travail de sortie va engendrer une modulation du control électrostatique du transistor ce qui mène à une fluctuation en terme de courant du drain.

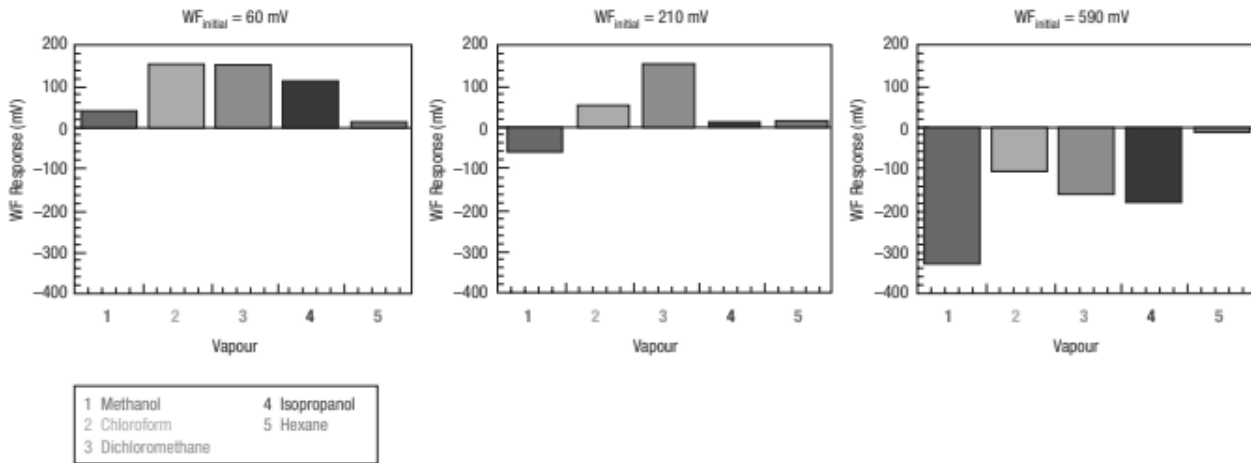


Figure I.9 Comparaison entre les réponses de la fonction de travail des couches conductrices de polymère à différentes vapeurs [10]

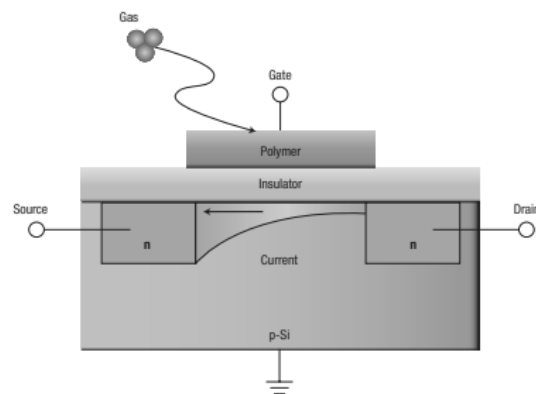


Figure I.10 Transistor à effet de champ en mode capteur de gaz basé sur la modulation de travail de sortie de la grille via le mesurande (i.e. gaz dans notre cas) [10]

Autrement dit, les molécules de gaz vont moduler la tension de la grille effective tout en laissant une traçabilité au niveau du courant de drain. Il est à noter qu'on va étudier la sensibilité du transistor à effet de champ à base de graphène en considérant la variation de travail de sortie en général sans une spécification d'un gaz. Comme indiqué dans la figure ci-dessus, le FET peut être doté d'un canal sensible au changement électrostatique engendré par la grille sensible au gaz. C'est exactement ce qu'on va proposer comme stratégie pour sensibilité élevée.

## **I.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude bibliographique sur les capteurs de gaz les plus réponsus dans l'industrie. Nous avons présenté également une généralité sur les transistors à effet de champ à savoir les MOSFETs, puis nous allons concentré sur les capteurs de gaz à base de transistor a effet de champs en mettant l'accent sur le principe de détection basé sur la modulation de travail de sortie de la grille par le gaz qui est le mesurande dans notre travail.

# Chapitre II

## Modélisation analytique d'un capteur de gaz à base de GFET

### II.1 Introduction

Ces dernières années, de nombreux scientifiques se sont concentrés sur la pollution de l'environnement et ses conséquences telles que le réchauffement climatique. L'attention est principalement due aux problèmes liés à la libération d'une grande quantité de gaz toxiques tels que le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), induits par une combustion imparfaite dans les automobiles et les zones industrielles. Différentes méthodes allant des laboratoires d'analyse sophistiqués et des systèmes de chromatographie en phase gazeuse aux appareils portables miniaturisés ont été introduites et utilisées pour la détection des gaz. Parmi les capteurs portatifs, les capteurs de gaz Metal-Oxide Semiconductor (MOS) ont grandement attiré l'attention des chercheurs

pour la détection de divers types de gaz en raison de leur qualité remarquable de haute sensibilité, haute sélectivité, faible consommation d'énergie, simplicité de fabrication, faible coût,.. etc. Les performances de ces capteurs peuvent être améliorées en ajoutant une quantité spéciale d'additifs et de catalyseurs aux matériaux MOS pour les rendre hautement sélectifs pour un gaz cible spécifique, augmenter leurs sensibilités et réduire la température de fonctionnement, qui est un paramètre nécessaire pour réduire la puissance de consommation. Il est important de noter que le graphène a donné une impulsion nouvelle au développement de ce type de capteurs, particulièrement les capteurs à base de transistors à effet de champ à canal en graphène.

## II.2 le graphène

Le graphène est une couche unique (monocouche) d'atomes de carbone, étroitement liés dans un réseau hexagonal en nid d'abeille. C'est un allotrope de carbone sous la forme d'un plan d'atomes à liaison  $sp^2$  avec une longueur de liaison moléculaire de 0,142 nanomètres. Des couches de graphène empilées les unes sur les autres forment du graphite, avec un espacement inter-planaire de 0,335 nanomètre. Les couches séparées de graphène dans le graphite sont maintenues ensemble par les forces de van der Waals, qui peuvent être surmontées lors de l'exfoliation du graphène à partir du graphite [11]. La figure ci-dessous présente une feuille de graphène.

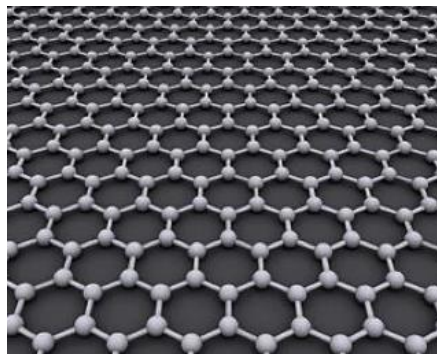


Fig. II. 1 la feuille de graphene (monocouche)



### II.3 Les capteurs de gaz à base de GFET

Dans le monde des capteurs chimiques, le graphène a attiré beaucoup d'attention, notamment parce que sa structure bidimensionnelle signifie que tout le volume du matériau agit comme une surface de capteur. De plus, le graphène offre une excellente résistance mécanique, une conductivité thermique et électrique, une compacité et un coût potentiellement faible, ce qui est nécessaire pour être compétitif sur le marché toujours croissant des capteurs chimiques [12].

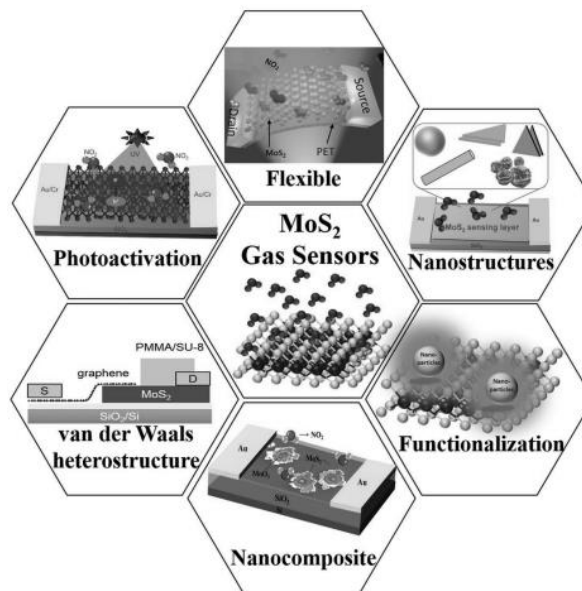


Fig. II. 2 Différent types de capteur de gaz à base de GFET

La configuration la plus simple et la plus courante pour les capteurs chimiques à base de graphène est le transistor à effet de champ de graphène (GFET), une feuille de graphène avec une zone de détection entre deux contacts métalliques. Dans ce dispositif, la conductivité peut être réglée en utilisant l'effet de champ électrique avec une grille arrière, ce qui donne une sensibilité très élevée. La mobilité des porteurs doit être élevée pour garantir des pertes minimales par chauffage. Le graphène est un candidat de choix pour créer des GFET de qualité supérieure en tant que capteurs chimiques, car le matériau lui-même est biocompatible, peut être utilisé sans protection dans des circonstances ambiantes, a une

mobilité ultra élevée et une faible résistivité. Cela signifie des capteurs chimiques plus efficaces qui conduiront à des ordinateurs et des appareils de mesure électroniques de qualité supérieure [12]. La figure II.2 montre quelques types émergents de capteurs de gaz à base de GFET.

## II.3 Modélisation analytique

### II.3.1 Concept du circuit capacitif

Pour mieux comprendre l'électrostatique du dispositif GFET on représente le circuit capacitif schématisé dans la figure ci-dessous

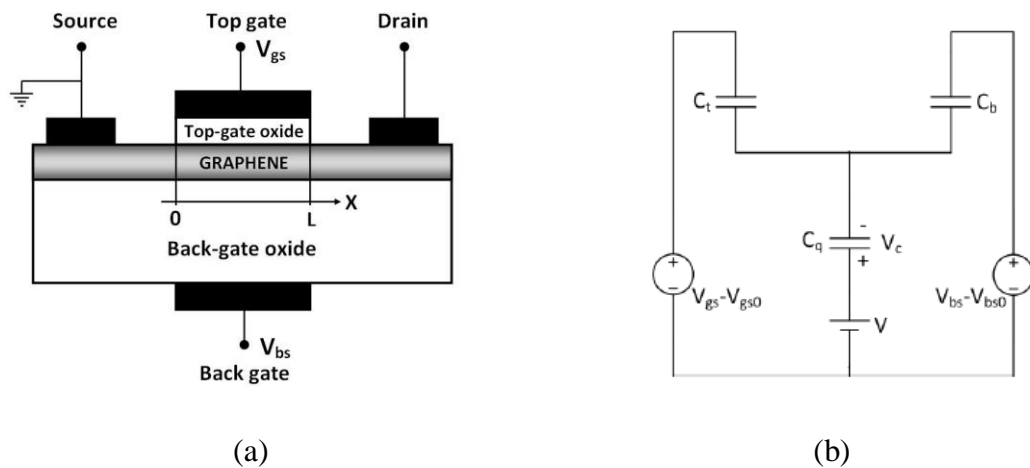


Figure II.3 (a) structure de GFET, (b) Schéma du modèle capacitif d'un GFET [14,15].

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.

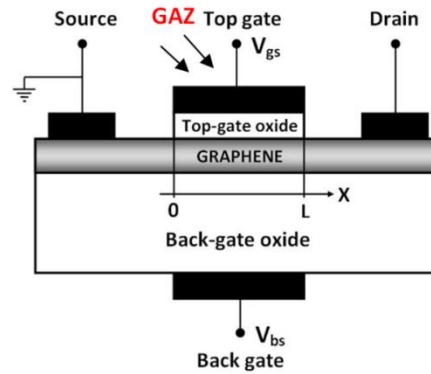


Figure II.4 GFET en mode capteur de gaz à base de modulation de travail de sortie de la grille.

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 net 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 [14,15]. Ce potentiel peut être décrit comme [14]

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

(II.1)

### II.3.2 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.

$C_q$  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

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

$$V_c(x) = (V_{gs} - V_{gs0} - V(x)) \frac{C_{PH}}{C_{PH} + C_b + \frac{1}{2}C_q} + (V_{bs} - V_{bs0} - V(x)) \frac{C_b}{C_{PH} + C_b + \frac{1}{2}C_q} \quad (\text{II.3})$$

Dont  $V_{gs} - V_{gs0}$  et  $V_{bs} - V_{bs0}$  sont la tension de la grille supérieure et inférieure, respectivement. Ces quantités comprennent la différence de travail de sortie entre les grilles et le canal de graphène. Il est très important de noter que ces quantités vont inclure la modulation de travail de sortie induite par l'introduction de gaz. Vu que le capteur sous l'étude possède une grille sensible supérieure, nous allons introduire le paramètre  $\Delta V_{GAZ}$  aux tensions de grilles effectives précitées.

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

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

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

$v(x)$  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

$$V_c = \frac{-(C_{PH} + C_b) + \sqrt{(C_{PH} + C_b)^2 \pm 2k[(V_{gs} - V_{gs0} - V)C_{PH} + (V_{bs} - V_{bs0} - V)C_b]}}{\pm k}$$

où le signe positif (négatif) est appliqué quand

$$(V_{gs} - V_{gs0} - V)C_{PH} + (V_{bs} - V_{bs0} - V)C_b > 0 (< 0) \text{ Respectivement.}$$

- 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 [14,15], nous pouvons obtenir [14,15]

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

Tel que :

$$gVcs = \left(-\frac{Vcs^3}{3}\right) - \left(\text{sign}(Vcs) * \left(\frac{K*(Vcs^4)}{4*CC}\right)\right) \quad (\text{II.6'})$$

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

Paramètres	Valeur
L	1 $\mu\text{m}$
W	2.1 $\mu\text{m}$
t <sub>OXT</sub>	15 nm
t <sub>OXB</sub>	285 nm
$\epsilon_{OXT}$	16
$\epsilon_{OXB}$	3.9
$\mu$	1200 cm <sup>2</sup> /V.s
R <sub>S(D)</sub>	800
$\rho_0$	1.10 <sup>11</sup> cm <sup>-2</sup>
$h\Omega$	55meV
V <sub>GS0</sub> (V <sub>BS0</sub> )	1.45 (2.7) V
V <sub>GS</sub>	Varie
V <sub>DS</sub>	Varie

**Table II.1.** Paramètres de modélisation GFET en double grille [6].

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

Pour prendre en considération les effets de résistance de la source et le drain, il faut résoudre l'équation implicite suivante:

$$V_{\text{ds}} = V_{\text{ds\_ext}} - I_{\text{ds}} (R_s + R_d) \quad (\text{II.8})$$

Pour plus de détails concernant les paramètres utilisés et les étapes de développement du model, nous referons à la référence [14,15]. Le tableau II.1 présente les paramètres utilisés dans la modélisation qui sont comparables avec [16].

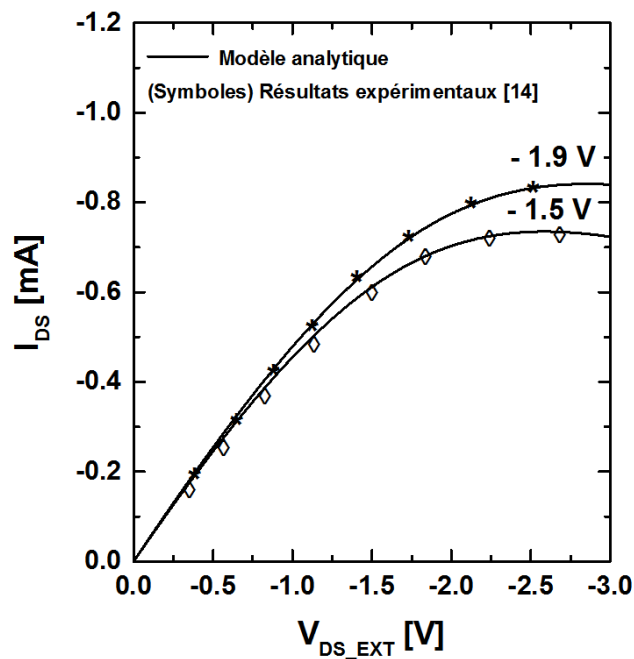


Figure II.5 Comparaison du model utilisé et les données expérimentales disponibles dans la littérature.

La figure II.5 montre le très bon accord entre le model utilisé et quelques données obtenues expérimentalement en termes de caractéristique de sortie. Il est à noter que la figure illustre le comportement du GFET en mode dispositif, pas en mode capteur.

## II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un model analytique précis de GFET basé sur le transport dérive-diffusion et le principe d'effet de champs. Nous avons indiqué où l'effet de gaz sera pris en considération physiquement dans le model analytique. Pour des fins de validation du code programmé, nous avons comparé les résultats obtenus par le model programmé avec quelques résultats expérimentaux reporté dans la littérature. Un très bon accord a été observé (dans le mode dispositif), ce qui nous a permis de passer à une étude analytique et paramétrique profonde.

# Chapitre III

## Evaluation de performance du capteur de gaz à base de GFET

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons effectuer une évaluation analytique en utilisant la modèle présenté dans le chapitre 2 afin de mettre en évidence la performance du capteur de gaz à base de GFET, plus particulièrement le comportement de sensibilité. Une étude paramétrique sera présentée également afin d'explorer l'impact des paramètres physiques, électriques, et dimensionnels sur la performance du capteur de gaz sous l'étude.



### III.2 Etude, analyse, et évaluation du capteur

Paramètres	Valeur
L	10 $\mu$ m
W	5 $\mu$ m
$h\Omega$	100 meV
$t_{\text{OXT}}$	40 nm
$V_{\text{GS0}}$	0.85 V
$\epsilon_{\text{OXT}}$	16
$R_{\text{S(D)}}$	300
$\mu$	7500 cm <sup>2</sup> /V.s
$\rho_0$	3e11 cm <sup>-2</sup>
$V_{\text{DS}}$	0.1 V

**Table III.1.** Paramètres de modélisation GFET avec grille supérieure.

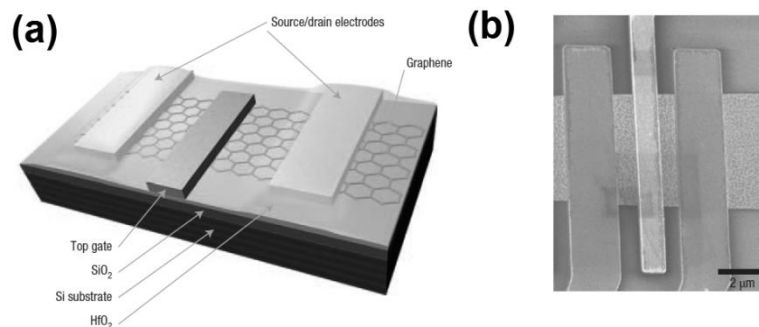


Fig. III.1 (a) Représentation de GFET avec grille supérieure [16]. (b) Réalisation expérimentale d'un dispositif similaire [16]

Tableau 1 montre les paramètres nominaux de la modélisation analytique à effectuer. Notant que le dispositif est un GFET à grille supérieure. Pour rappel, L signifie la longueur du canal en graphene, W est la largeur de la grille,  $t_{\text{OX}}$  est la hauteur de la couche diélectrique supérieure,  $\epsilon_{\text{OX}}$  est sa constante diélectrique,  $V_{\text{GS0}}$  est la quantité de tension qui comprend la différence de travail de sortie (WF) entre les grilles et le canal de graphène,  $R_{\text{S(D)}}$  est la résistance de la source (drain),  $\rho_0$  est la densité des porteur sur la feuille ;  $\Omega$  est fournit par l'énergie effective du phonon  $\Omega\hbar$ ,  $\mu$  est la mobilité inférieure du champ,  $q$  est la charge d'électron, et  $V_{\text{DS}}$  est la tension drain-source. Fig. III.1(a) montre le GFET avec grille

supérieure [16]. C'est la même structure qu'on a considéré pour la modélisation à part la considération d'une grille sensible au gaz. Comme nous voyons dans la même figure, la grille est localisé sur une couche de  $\text{HfO}_2$  pour le control électrostatique des porteurs sur le graphene. Les électrodes de la source et le drain sont représentés également. On peut voir aussi que le dispositif est déposé sur une couche de  $\text{SiO}_2$  et un substrat en Si. Fig. III.1(b) montre une image microscopique d'un GFET réalisé par I. Meric *et al.*, *nature nanotechnology*, 2008 [16].

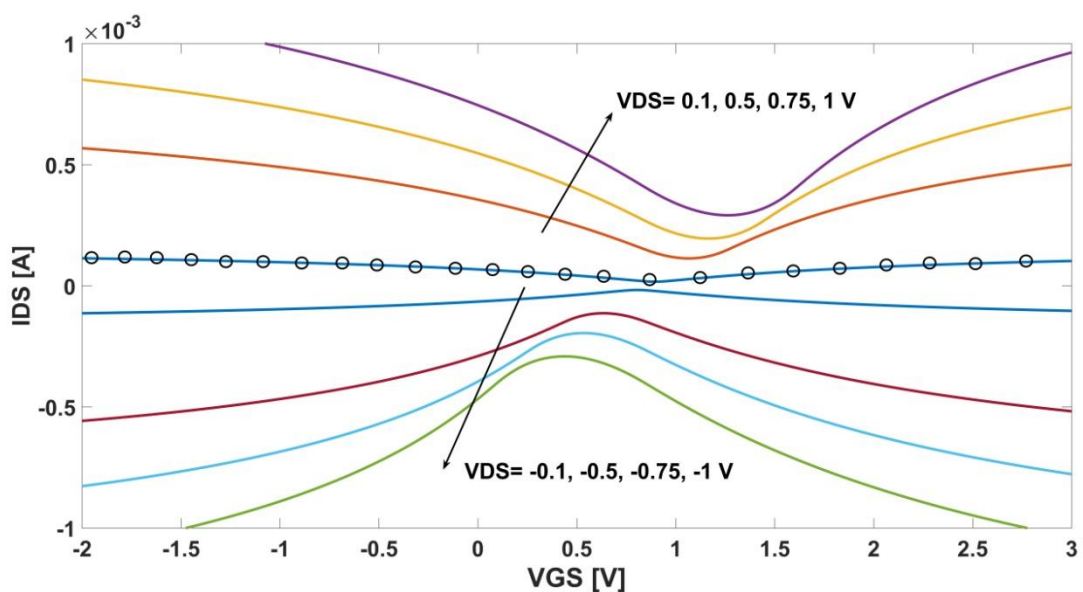


Fig. III.2 la caractéristique  $I_{DS}$ - $V_{GS}$  du dispositif GFET pour plusieurs valeurs de  $V_{DS}$ .

La figure III.2 montre la caractéristique de transfert du transistor à effet de champ à canal en graphene pour plusieurs valeurs de la tension drain-source. La figure montre également le bon accord avec les résultats expérimentaux (indiqué par des cercles) tout en confirmant la bonne programmation du model développé dans [14]. En analysant la figure, on peut clairement observer que le comportement du GFET n'est pas comme celui d'un transistor conventionnel qui se caractérise par une région sous seuil, tension de seuil, et une région au dessus du seuil [9,14]. Cela est principalement attribué à la nature de graphene qui est un

matériaux semi-métallique autrement dit, son énergie de *la bande interdite* est nulle (*gapless*). C'est pour cette raison nous allons prendre en considération la sensibilité comme le rapport de variation du courant avant et après l'exposition au gaz et également le décalage de la tension en point de Dirac. Il est très important de noter que l'excellent accord enregistré est attribué à la considération des résistances de la source et le drain (les électrodes) en résolvant l'équation implicite [14-16]. On peut observer également que le comportement d'une inversion ou bien "switch" est quasiment inexistant, et la caractéristique consomme une consommation significative ( $\approx 2$  V) pour passer du courant faible au courant fort. Notant que le GFET est prometteurs en mode capteur mais il n'est pas valable pour les applications logiques.

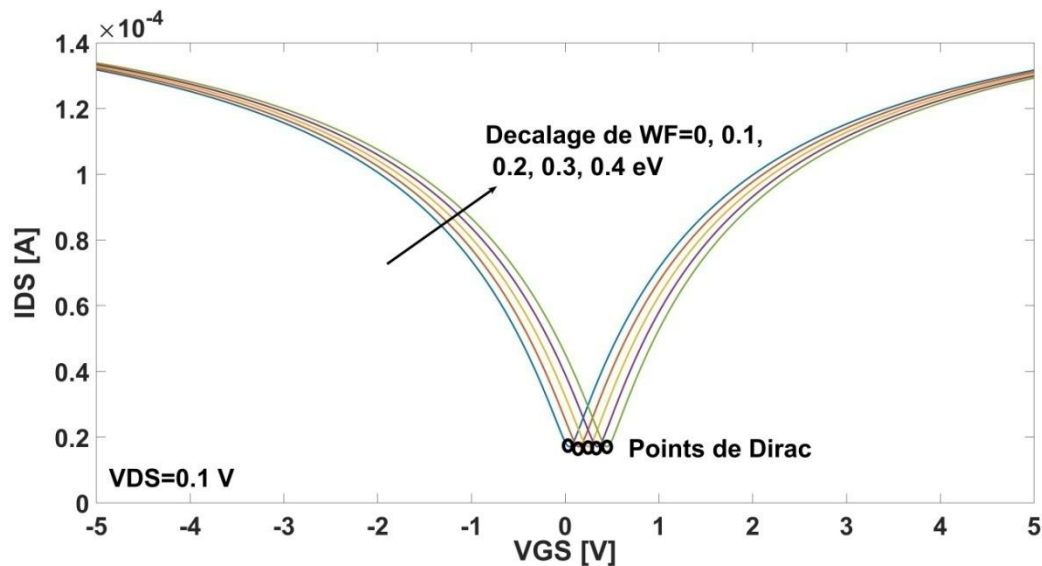


Fig. III.3 La caractéristique  $I_{DS}$ - $V_{GS}$  du GFET en mode capteur pour plusieurs valeurs de différence en travail de sortie  $\Delta WF$ .  $V_{DS} = 0.1$  V

La figure III.3 montre le comportement de la caractéristique de transfert du GFET en mode détection. On peut voir que la courbe I-V se décale dans la direction positive. Une faible tension drain-source,  $V_{DS}$ , est considéré afin simuler le capteur dans un regime à faible consommation d'énergie, ce qui est très important pour les capteurs de gaz avancés à base de FETs. Notant que le décalage devient important de plus en plus avec l'augmentation de la

concentration du gaz traduite par l'augmentation du décalage du travail de sortie. Inspectant la même figure, nous pouvons voir qu'il y a une sorte de comportement ambipolaire, qui est une caractéristique connue de GFETs. Nous pouvons observer également les points de Dirac, qui peuvent se définir comme le point de  $V_{GS}$  où le courant du drain est minimal [16]. Pratiquement, le décalage de la caractéristique de transfert du dispositif sous l'étude reflète l'existence d'une sensibilité soit en terme de point de Dirac soit en terme du rapport de la variation du courant de drain avant et après l'exposition au gaz. Si on inspecte le comportement I-V dans la même figure, nous pouvons clairement remarquer que la variation du courant du drain varie tout au long de la plage considérée de la tension de grille. Alors, il est indispensable de localiser le régime ou la tension de grille dans la quelle le capteur sous l'étude exhibe une haute sensibilité.

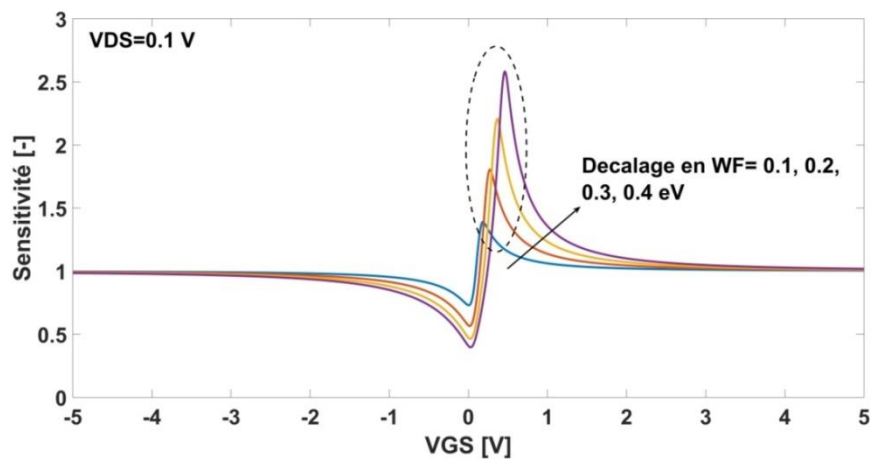


Fig. III.4 La sensibilité en fonction de la tension  $V_{GS}$  pour plusieurs valeur de  $\Delta WF$  considérant  $V_{DS}=0.1$  V

La figure III.4 montre le comportement de la sensibilité  $SS = I_{DS-AVANT}/I_{DS-APRES}$ , (le rapport du changement en courant du drain avant et après l'exposition au gaz) par rapport au variation du gaz qui résulte les changements de travail de sortie de la grille sensible ( $\Delta WF = 0.1, 0.2, 0.3, \text{ et } 0.4$  eV). Nous pouvons observer que la sensibilité est faible pour les grandes valeurs (positives et négatives) de  $V_{GS}$ , ou autrement dit, il n'y a pas un changement significative en terme du courant du drain. En plus, nous pouvons clairement remarquer que la

meilleure sensibilité (entourée par un cercle discontinu) est enregistrée dans la région entre  $V_{GS}=0.5-1$  V. Notant que cette région d'intérêt est proche (à droite) au point de Dirac. Cela est physiquement interprété par l'observation d'une pente raide du courant du drain (*low subthreshold swing*) qui reflète la grande sensibilité du transport du dispositif aux changements de la tension  $V_{GS}$  effective qui inclue la modulation du travail de sortie induite par la concentration du gaz (Voir la figure de la caractéristique de transfert). Une meilleure sensibilité peut être recordé également en considérant le comportement ambipolaire (pour les  $V_{GS}$  négatives, si on considère  $SS= I_{DS-APRES} / I_{DS-AVANT}$  ). Il est important donc, d'opérer le capteur de gaz proposé dans un régime de fonctionnement convenable afin de maximiser, la sélectivité, la sensibilité, et la limite de détection qui sont des caractéristiques très importantes dans les capteurs de gaz futuristes.

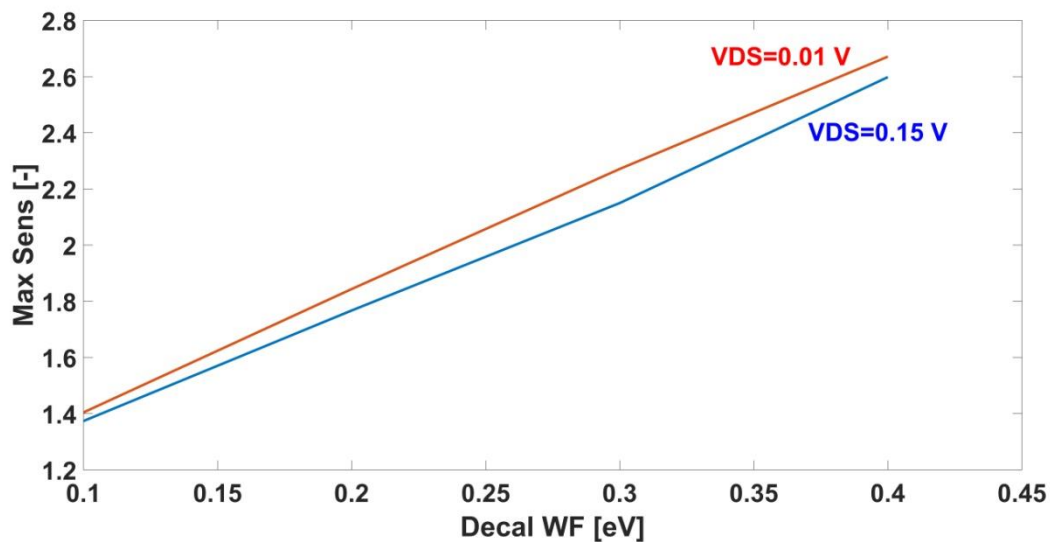


Fig. III.5 Le maximum de la sensibilité en fonction du changement de travail de sortie pour deux valeurs différentes de  $V_{DS}$ .

La figure III.5 montre l'impact de la tension  $V_{DS}$  sur le maximum de la sensibilité enregistré dans la région sensible (près du point de Dirac). On peut observer le comportement

linéaire de la caractéristique. Il est clairement observable également que la faible valeur de  $V_{DS}$  (0.01 V) fournit un meilleur maximum de sensibilité tout au long de la gamme considérée de la concentration de gaz (i.e.  $\Delta WF$ ). Inspectant la même figure, on peut clairement observer que l'amélioration est plus significative pour les décalages importants de travail de sortie ( $\Delta WF$ ) par rapport aux petits changements. Le comportement enregistré est logiquement attribué à la faible concentration de porteur (attribué au faible  $V_{DS}$ ) qui diminue le courant de Dirac tout en mettant la pente du courant du drain dans la région d'intérêt plus raide. Sur ce, il est indispensable que cette étude paramétrique inclue la densité des porteurs induite par les impuretés,  $\rho_0$ , qui a un rôle considérable dans la détermination du courant du drain minimal.

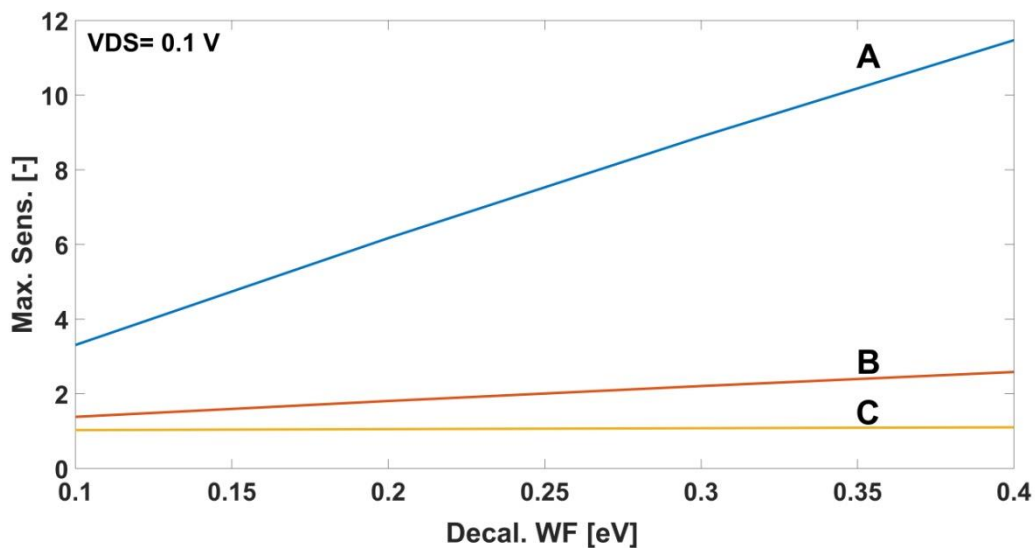


Fig. III.6 Le maximum de la sensibilité en fonction du changement de travail de sortie pour trois valeurs différentes de  $\rho_{0A} = 0.3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ,  $\rho_{0B} = 3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ,  $\rho_{0C} = 3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ .

La figure III.6 montre l'impact de la densité des porteurs induits par les impuretés sur le maximum de la sensibilité du capteur de gaz proposé GFET. Nous pouvons clairement observer que la diminution de la densité des impuretés mène à une optimisation de sensibilité en terme de changement du courant du drain. Comme nous avons souligné auparavant, ce

comportement d'amélioration est principalement attribué à la faible concentration de porteur au niveau de la feuille de graphène ( le canal) qui diminue le courant de Dirac tout en mettant la pente du courant du drain dans la région d'intérêt plus raide, et donc la sensibilité s'améliore en conséquence. Il est important de noter que l'optimisation des autres paramètres (tels que l'épaisseur de l'oxyde et le diélectrique) influant sur la pente sous seuil (ici en GFET la région sensible) pourra mener à des plus grande valeurs de sensibilité. L'étude paramétrique menée permet au concepteur non seulement de viser une fabrication optimisée mais aussi de réduire le coup de l'élaboration de tels dispositifs.

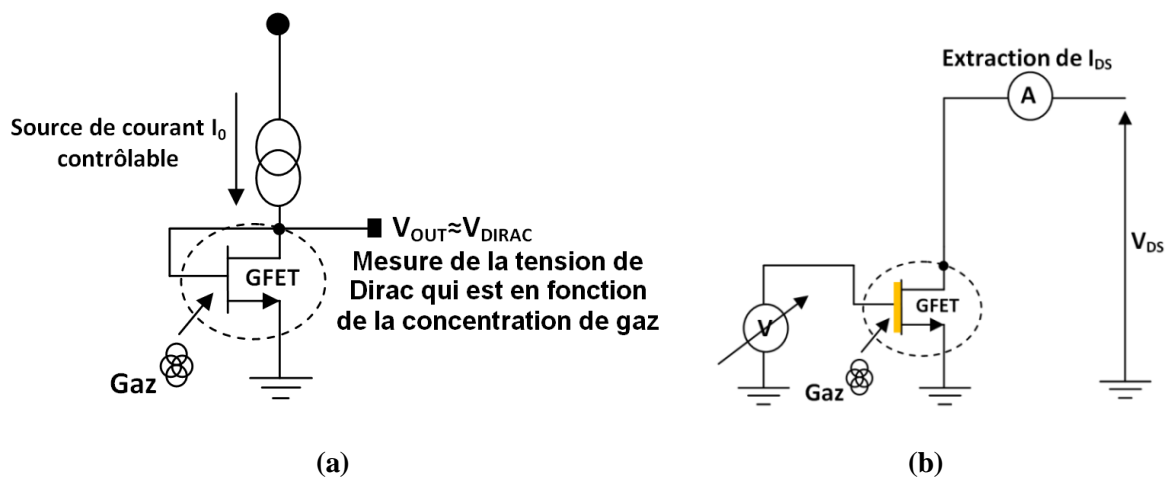


Fig. III.7 Les circuits de lecture possible pour le capteur de gaz sous l'étude. (a) Suiveur de point de Dirac (b) Traceur de caractéristique de transfert.

Fig. III.7(a) montre un circuit de lecture populaire de tension de seuil, qui peut être utilisé dans la phase test. Pratiquement, le courant du drain du capteur à base de GFET est contrôlé par une source de courant en l'ajustant au point de Dirac. Sur ce, tout changement de tension de grille effective attribué à la présence de gaz est reflété par la tension mesurée  $V_{OUT}$  qui estime le décalage du point de Dirac. La tension obtenu peut être passé aux autres blocks comme montre la figure III.8.

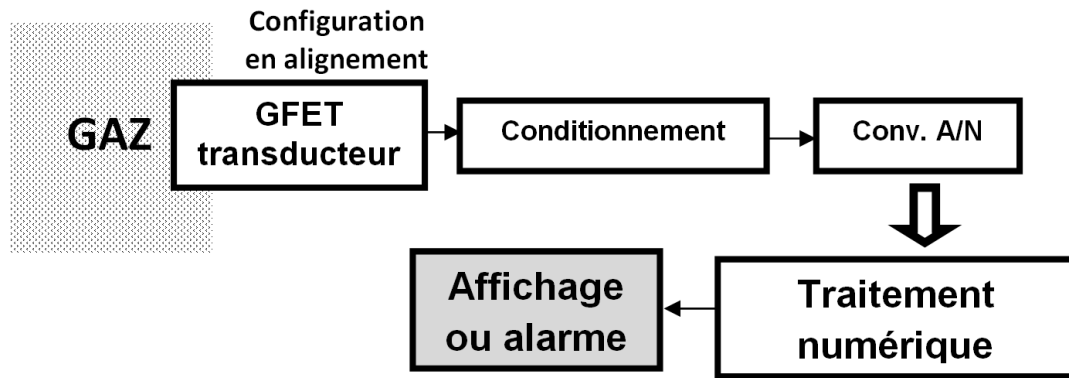


Fig. III.8 Imagination d'une chaîne de mesure éventuelle pour une implémentation dans une librairie de simulation.

Fig. III. 7(b) montre un simple circuit de traçage de la caractéristique de transfert,  $I_{DS}$ - $V_{GS}$ . Dans ce circuit, la tension  $V_{DS}$  est fixé, tandis que la tension  $V_{GS}$  est variée en extrayant les valeurs de courant. Ce genre de circuit doit être couplé avec des autres blocks pour effectuer le conditionnement, le traitement numérique et enfin l'affichage comme la figure III.8 montre.

### III.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons effectué une modélisation analytique tout en traçant des courbes et des abaques afin de comprendre analytiquement le comportement du capteur de gaz à base de GFET. La discussion et l'interprétation des performances comportent la sensibilité, la caractéristique I-V, le maximum de sensibilité, et l'impact des paramètres physiques, électriques, et dimensionnels sur la performance de détection du capteur. Il a été souligné que la région de sensibilité (en terme de variation du courant de drain avant et après l'exposition au gaz) la plus convenable se situe dans la région proche du point de Dirac où la pente sous seuil est plus raide. En plus, nous avons trouvé que le choix de  $V_{DS}$  et le control de la densité des impuretés dans le graphène peuvent jouer un rôle considérable dans l'amélioration de la sensibilité du capteur de gaz à base de GFET. Le chapitre est clôturé par la proposition de quelques circuits de lecture de base et une chaîne de mesure qui peut être mis en point dans des études expérimentales poussées.



## Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous modélisons analytiquement un capteur micronique de gaz à base de transistor à effet de champ à canal en graphène (GFET). La modélisation analytique adoptée est basée sur le transport dérive-diffusion en conjonction avec le modèle d'effet de champ qui comprend la modulation de travail de sortie de la grille. En fait, ce projet de fin d'étude (PFE) est réparti en 3 chapitres:

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur le mesurage (gaz), types de capteurs de gaz, les transistors à effet de champs, et le principe de détection basé sur la modulation de travail de sortie. Le chapitre 1 nous a permis d'avoir une compréhension profonde, surtout sur la physique des phénomènes en la matière.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté un modèle analytique du GFET, basé sur le transport dérive-diffusion et le modèle à effet de champs. Nous avons ensuite incorporé le principe de détection de gaz dans le modèle du GFET en considérant la modulation de travail de sortie de la grille. Les caractéristiques I-V du GFET ont été validées en considérant quelques résultats expérimentaux disponibles dans la littérature.

Le troisième chapitre présente une évaluation analytique du capteur de gaz à base de GFET en utilisant le modèle présenté dans le chapitre 2. L'analyse a comporté le comportement de la caractéristique  $I_{DS}-V_{GS}$ , la sensibilité, le maximum de la sensibilité, la région optimale de la sensibilité, et l'impact des paramètres physiques et électriques sur le comportement de la sensibilité.

Il a été trouvé que la haute sensibilité est capturée près du point de Dirac, où la pente du courant du drain est plus raide. De plus, nous avons trouvé que le maximum de la sensibilité

est améliorable tout en choisissant les paramètres optimaux (physique, géométriques et électriques) du capteur.

Ce mémoire de fin d'étude peut supporter le commencement d'une recherche théorique et/ou expérimentale poussée, afin de paver la route à l'expérimentation/l'élaboration, la maîtrise technologique, et pourquoi pas, la production.

## Références

- [0] P. Menini. Du capteur de gaz a oxydes métalliques vers les nez électroniques sans fil. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2011.
- [1] <https://safetylife.fr/content/20-comment-fonctionnent-capteurs-detecteurs-gaz>
- [2] <https://www.processsensing.com/fr-fr/technologies/technologies-de-detection-des-gaz/>
- [3] <https://www.mavili.com.tr/fr/environnements-explosifs-3/1793-environnements-explosifs-3.html>
- [4] <https://stringfixer.com/fr/Katharometer>
- [5] <https://detekta.ca/capteurs-electrochimique/>
- [6] El Younsi, Imane. (2015). Elaboration et caractérisation de nouvelles couches sensibles pour la réalisation de capteurs de CO<sub>2</sub>.
- [8] A. Djafer et al. "Etude et modélisation d'un capteur de pH à base de transistor à effet de champ", PFE: Electronique-Instrumentation, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2020.
- [9] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Travail\\_de\\_sortie#:~:text=En%20physique%2C%20en%20m%C3%A9canique%20quantique,m%C3%A9tal%20\(niveau%20du%20vide\).](https://fr.wikipedia.org/wiki/Travail_de_sortie#:~:text=En%20physique%2C%20en%20m%C3%A9canique%20quantique,m%C3%A9tal%20(niveau%20du%20vide).)
- [10] J. Janata and M. Josowicz, "Conducting polymers in electronic chemical sensors," *Nature Materials*, vol. 2, no. 1. Springer Science and Business Media LLC, pp. 19–24, Jan. 2003. doi: 10.1038/nmat768.
- [11] <https://www.graphenea.com/pages/graphene#.Yod4IMPP3IU>
- [12] <https://www.graphenea.com/blogs/graphene-news/graphene-field-effect-transistors-for-chemical-sensing>
- [13] Kumar, R., Zheng, W., Liu, X., Zhang, J., Kumar, M., MoS<sub>2</sub>-Based Nanomaterials for Room-Temperature Gas Sensors. *Adv. Mater. Technol.* 2020, 5,1901062.
- [14] D. Jiménez et al., "Explicit drain-current model of graphene field-effect transistors targeting analog and radio-frequency applications," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 58, no. 11, pp. 4049–4052, Nov. 2011.
- [15] D. Jiménez, "Explicit Drain Current, Charge and Capacitance Model of Graphene Field-Effect Transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 58, no. 12, p. 4377, Dec. 2011.
- [16] I. Meric et al., "Current saturation in zero-bandgap, top-gated graphene field-effect transistors," *Nature Nanotechnol.*, vol. 3, pp. 654–659, 2008.

يدرس هذا العمل مستشعر غاز يعتمد على ترانزستور التأثير الميداني، قائم على الجرافين (GFET) باستخدام نهج النمذجة التحليلية. في الفصل الأول، قدمنا عموميات حول الهدف المراد استشعاره (الغاز)، أجهزة استشعار الغاز المختلفة، مبادئ استشعار الغاز، وتطبيقات استشعار الغاز. بالإضافة إلى ذلك، قدمنا نظرة عامة على ترانزستور التأثير الميداني (FET) واستخدامه في استشعار الغاز مع التركيز على مبدأ استشعار الغاز القائم على تعديل دالة الشغل. في الفصل الثاني، قدمنا، برمجنا، ونفذنا في MATLAB نموذجًا تحليليًا يعتمد على نقل انجراف-انتشار و مبدأ التأثير الميداني من أجل التحليل الأولي لجهاز GFET. يجدر الذكر أنه تم التحقق من صحة البرنامج المنفذ بمقارنته ببعض البيانات التجريبية المتوفرة في الأدبيات ذات الصلة. في الفصل الثالث، قدمنا تحقيقًا مفصلاً قائمًا على النمذجة باستخدام النموذج المذكور أعلاه، حيث تم إدخال مصطلح برمجي يصف تغيير دالة الشغل داخل النموذج لتضمين اثر الغاز على بوابة الترانزستور. تضمن التحقيق الحسابي المنجز تيار الصرف، خصائص النقل، الحساسية، الحساسية القسوى، وتأثير المعلومات الكهربائية، الفيزيائية و الهندسية على أداء استشعار الغاز. الجزء الأخير من عملنا هو استنتاج مبني على النتائج التي تم الحصول عليها. يمكن أن توفر هذه الدراسة نقطة انطلاق لإجراء تحقيقات وتحليلات أعمق.

**الكلمات الدالة:** الغاز، الجرافين، ترانزستور التأثير الميداني، حساسات الغاز، النمذجة.

## Abstract

This work studies a gas sensor based on graphene field-effect transistor (GFET) using an analytical modeling approach. In the first chapter, we gave a generality on the measurand (gas), different gas sensors, gas sensing principles, and gas sensing applications. In addition, we have given an overview on field-effect transistor (FET) and its implication in gas sensing while focusing on the work function modulation-based gas sensing principle. 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 device. Note that the performed code has been validated while comparing it with some experimental data available in literature. In the third chapter, we have presented a detailed modeling-based investigation using the aforementioned model, where a term describing the work function modulation has been inserted in the flat band quantities within the model. The investigation has included the drain current, the transfer characteristics, the sensitivity, the maximum sensitivity, and the impact of electrical, physical, and dimensional parameters on the gas sensing performance. The last part of our work is a conclusion based on the obtained results. This study can provide a starting point for deeper investigations and analyses.

**Keywords:** gas, Graphene, FET, gas sensors, modeling.

## Résumé

Ce travail étudie un capteur de gaz basé sur un transistor à effet de champ à canal en graphène (GFET) en utilisant une approche de modélisation analytique. Dans le premier chapitre, nous avons donné une généralité sur le mesurande (gaz), les différents capteurs de gaz, les principes de détection de gaz et les applications de détection de gaz. De plus, nous avons donné un aperçu sur le transistor à effet de champ (FET) et de son implication dans la détection de gaz tout en nous concentrant sur le principe de détection de gaz basé sur la modulation de travail de sortie. 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 de l'effet de champ afin d'analyser préalablement le dispositif GFET. A noter que le code réalisé a été validé en le comparant à certaines données expérimentales disponibles dans la littérature. Dans le troisième chapitre, nous avons présenté une étude détaillée basée sur la modélisation à l'aide du modèle susmentionné, où un terme décrivant la modulation du travail de sortie a été inséré dans les quantités de bande plate du modèle. L'étude a inclus le courant du drain, les caractéristiques de transfert, la sensibilité, la sensibilité maximale et l'impact des paramètres électriques, physiques et dimensionnels sur les performances de détection de gaz. La dernière partie de notre travail est une conclusion basée sur les résultats obtenus. Cette étude peut fournir un point de départ pour des études et des analyses plus approfondies.

**Mots clés:** gaz, Graphène, TEC, capteurs de gaz, modélisation.

*Cette page a été laissée intentionnellement blanche*