

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU**



**FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE**

## **Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER ACADEMIQUE**

**Filière :** Electronique

**Spécialité :** Electronique des systèmes embarqué

### **Thème**

**Conception et réalisation d'un système intelligent  
Multi-gaz**

**Réaliser par :**

**ABERKANE Ghania**

**AIT MOHAMED Lydia**

**Devant le jury :**

- **Président :** IDJERI Boussad
- **Examineur :** HAMMOUCHE Hayat
- **Promoteur :** LAGHROUCHE Mourad

**Année universitaire : 2023/2024**

## *Remerciements*

Merci Dieu de m'avoir donné la force et le courage de tenir jusqu'à la fin de ce travail.

Je tiens à remercier mon promoteur Mr LAGHROUCHE pour l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et que je ne remercierai jamais assez pour son soutien et sa patience, qu'il trouve dans ces lignes l'expression de ma gratitude

J'adresse encore mes sincères remerciements à tout le corps professoral et administratif du département de génie électrique et d'informatique de l'université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou pour la richesse et la qualité de leurs enseignements et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée J'exprime également ma gratitude aux membres de jury, qui nous ont honorés en acceptant d'évaluer et de juger ce travail Je souhaite aussi adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont aidé et contribué à l'élaboration de ce mémoire.

## Dédicaces

Je dédie ce travail à mes chers parents qui ont su me donner du courage et du soutien tout au long de mon cursus.

A mes chers frères et sœurs Mhamed amine, Rezki, Kamel, Souad.

A mes grands parents maternel Mohamed et Hadjila.

A mes oncles et tantes said , Djamila , Fazia, Kamel ,Karima .

A tout mes amies notamment Hamdani Lilia et allileche djouher qui sont toujours là aux moments difficiles.

Sans oublier ma binôme AIT MOHAMED Lydia.

ABERKANE Ghania.

## Dédicaces

Je dédie à mon père bien-aimé, même en son absence, ce mémoire est un témoignage de l'impact profond de son amour et de son soutien dans ma vie et dans mes études. Tu me manques chaque jour, mais je sais que tu serais fier de moi aujourd'hui.

À ma chère maman, ton amour inconditionnel et tes encouragements ont été mes phares tout au long de ce parcours académique. Ce mémoire t'est dédié avec une immense gratitude et affection.

À mes chers frères et sœurs Mahfoud, Kamel, Massilia, Kenza, Ania, Lylia, et ma petite Alice.

À mes beaux-frères Mouloud et Djigou, belles-sœurs Kamilia et Hinouche.

À mes grands-parents maternels Mokrane et Ourdia.

À mon cher mari Smail, compagnon de vie et source constante de soutien et d'inspiration.

À mes oncles et tantes Brahim, Mouh Akli, Fatima, Sadia, Karima.

À toutes mes amies, notamment Oubllile Siham et Allileche Djouher, qui sont toujours là aux moments difficiles.

Sans oublier ma binôme Aberkane Ghania.

AIT MOHAMED Lydia

# SOMMAIRE

Introduction Général .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les capteurs de gaz</b>	
I.1. Introduction .....	2
I.2. La définition des odeurs .....	2
I.2.1. Caractéristiques des odeurs .....	2
I.2.2. Paramètres des odeurs .....	3
I.3. Méthode d'analyse des gaz .....	3
I.3.1. Chromatographie en phase gazeuse .....	3
I.3.2. Spectrométrie de masse .....	4
I.3.3. Spectrométrie d'absorption .....	5
I.3.4. Méthode colorimétrique .....	5
I.3.5. Méthode olfactométrique .....	6
I.3.6. Méthode thermique .....	6
I.3.6.1. Catharométrie .....	6
I.3.6.2. Combustion catalytique .....	6
I.3.7. Méthode électronique .....	7
I.3.7.1. Oxyde semi-conducteur .....	7
I.3.7.2. Mesure des composés organiques par ionisation de flamme .....	7
I.3.7.3. Mesure des composés organiques par photo ionisation .....	7
I.3.8. Autres méthodes .....	8
I.3.8.1. Chimiluminescence .....	8
I.3.8.2. Fluorescence UV .....	8
I.3.8.3. Paramagnétisme .....	8
I.4. Capteur de gaz .....	10
I.4.1. Définition de capteur de gaz .....	10
I.4.2. Principales familles de capteur de gaz .....	10
I.4.2.1. Les capteurs de gaz à mesure directe (simple) .....	10
I.4.2.2. Les capteurs de gaz à mesure indirecte (complexe) .....	14
I.4.3. Caractéristique d'un capteur de gaz .....	17
I.4.3.1. Sensibilité .....	17
I.4.3.2. Stabilité .....	18

I.4.3.3. Sélectivité.....	18
I.4.3.4. Temps de réponse .....	18
I.4.3.5. Température de fonctionnement .....	18
I.4.4. Comparaison des performances de différents types de capteur .....	18
I.4.5. Capteur semi-conducteur .....	19
I.4.5.1. Définition d'un semi-conducteur .....	19
I.4.6. Capteur oxyde métallique .....	20
I.4.6.1. Historique.....	20
I.4.6. 2. Structure d'un capteur MOX .....	20
I.4.6.3. Mode de fonctionnement .....	20
I.4.6.4. La conductivité.....	21
I.4.6.5. Interaction Gaz – Solide.....	21
I.4.6.6. Rôle de l'oxygène et principe de détection .....	21
I.5. Conclusion.....	22

## **Chapitre II : Représentation matériel et logiciel de système**

II.1 Introduction .....	23
II.2 Description général du système .....	23
II.3 Partie matériel .....	23
III.3.1 Représentation des capteurs .....	23
II.3.1.1 Capteur MQ2 .....	23
II.3.1.1.2 Caractéristiques .....	24
II.3.1.2 Capteur MQ3 .....	25
II.3.1.2.1 Caractéristiques .....	25
II.3.1.3 Capteur QM-135.....	26
II.3.1.3.1. Caractéristiques .....	26
II.3.1.4 Capteur MQ4 .....	27
II.3.1.4.1 Caractéristiques .....	27
II.3.1.5 Capteur DHT11.....	28
II.3.1.5.1 Caractéristiques .....	29
II.3.1.6 Capture BMP280 .....	29
II.3.1.6.1 Caractéristiques.....	29
.III.3.3 Microcontrôleur.....	29
II.3.3.1 Caractéristiques .....	31
II.3.3.1.1 Le processeur .....	31

II.3.3.1.2 Mémoire interne .....	31
II.3.3.1.3 Flash externe et SRAM .....	31
II.3.3.1.4 Le WI-FI .....	31
II.3.3.1.5 Bluetooth classique et Bluetooth basse énergie (BLE) .....	32
II.3.3.1.6 Les périphériques .....	32
II.4 Partie logicielle .....	33
II.4.1 Langage de programmation Arduino .....	33
II.4.1.1 Fonctions de langage .....	33
II.4.1.2 Structure d'un programme .....	34
II.4.1.3 Applications d'Arduino .....	34
II.4.1.4 Interface du logiciel .....	35
II.4.2 ThingSpeak, plate-forme gratuite pour l'Internet des objets (IoT) .....	39
II.4.2.1 Définition API .....	39
II.4.2.2 Fonctions du ThingSpeak .....	39
II.4.2.3 Configuration ThingSpeak à l'aide de la plate-forme Arduino .....	40
II.5 Conclusion .....	43

### **Chapitre III : Réalisation du système de mesure multi-gaz.**

III .1 Introduction .....	44
III .2 La réalisation du projet.....	44
III .2 .1 Capteur de gaz MQ-135 .....	44
III .2 .2 Capteur de gaz MQ-4 .....	45
III .2 .3 Capteur de gaz MQ-3 .....	45
III .2 .4 Capteur de gaz MQ-2 .....	46
III .2 .5 Capteur DHT11 .....	47
III .2 .6 Capteur BMP280.....	48
III .2 .7 L'afficheur LCD .....	49
III .3 Conception de la partie commande .....	51
III.3.1 Construire notre carte de commande .....	51
III.3.2 Etapes de fabricant la carte .....	51
III.4 Réalisation du système .....	53

III.5 Fonctionnalités du système.....	53
III.5.1 Programmation de la carte ESP32.....	54
III.5.2 Composition du programme Arduino .....	54
III.6 Organigramme du fonctionnement général .....	56
III.7 Organigramme de la fonction «calibration » .....	58
III.8 Organigramme de la fonction mesure dans le programme Arduino .....	59
III.9 Résultats des essais .....	60
III.9.1 Premier test .....	60
III.9.2 Deuxième test .....	62
Conclusion général .....	64

## Table des figures

<b>Figure 01</b> : Schéma d'un chromatographe .....	4
<b>Figure 02</b> : Spectrométrie de masse.....	5
<b>Figure 03</b> : Un tube réactif .....	5
<b>Figure 04</b> : Un jury de nez en train d'effectuer un teste d'olfactométrie .....	6
<b>Figure 05</b> : Détecteur à ionisation de flamme.....	7
<b>Figure 06</b> : a) Un capteur GASFET .....	11
<b>Figure 06</b> : b) Transistor MOSFET .....	12
<b>Figure 07</b> : Schéma d'un capteur électrochimique.....	13
<b>Figure 08</b> : Capteur de gaz à base d'oxyde métallique: matériau sensible déposé sur un substrat chauffant .....	14
<b>Figure 09</b> : Structure d'un capteur à microbalance de quartz.....	15
<b>Figure 10</b> : Structure d'un capteur à ondes acoustiques de Surface .....	15
<b>Figure 11</b> : Capteur a fibre optique.....	16
<b>Figure 12</b> : Courbe du temps de réponse d'un capteur.....	17
<b>Figure 13</b> : Structure de premier capteur de gaz réalisé par TAGUSHI .....	20
<b>Figure 14</b> : Schéma synoptique de système.....	23
<b>Figure 15</b> : Capture MQ2 .....	24
<b>Figure 16</b> : Les caractéristiques de sensibilité typique de MQ-2 pour plusieurs gaz .....	24
<b>Figure 17</b> : Capture MQ3 .....	25
<b>Figure 18</b> : Les caractéristiques de sensibilité typique de MQ-3pour plusieurs gaz.....	26
<b>Figure 19</b> : Capture QM-135.....	26
<b>Figure 20</b> : Les caractéristiques de sensibilité typique de MQ-135 pour plusieurs gaz.....	27
<b>Figure 21</b> : Capture MQ4 .....	27
<b>Figure 22</b> : Les caractéristiques de sensibilité typique de MQ-4 pour plusieurs gaz.....	28
<b>Figure 23</b> : Capture DHT11.....	28
<b>Figure 24</b> : Capture BMP280 .....	29
<b>Figure 25</b> : Carte ESP32 .....	30
<b>Figure 26</b> : Schéma fonctionnel du l'ESP32 .....	30
<b>Figure 27</b> : Les broches de l'ESP32 .....	33
<b>Figure 28</b> : Interface de logiciel Arduino .....	35
<b>Figure 29</b> : Interface de programmation Arduino "Sketch" .....	36
<b>Figure 30</b> : Différentes zones de l'interface du logiciel.....	36

<b>Figure 31:</b> Différentes options de menu "Fichier" .....	37
<b>Figure 32:</b> Différents boutons de logiciel.....	38
<b>Figure 33:</b> L'interface d'accueil du ThingSpeak .....	39
<b>Figure 34:</b> L'interface pour s'inscrire dans ThingSpeak.....	40
<b>Figure 35:</b> Création du canal de communication.....	41
<b>Figure 36 :</b> Détails du canal de communication .....	42
<b>Figure 37:</b> Génération de la clé API.....	43
<b>Figure 38:</b> Schéma de branchement de capteur MQ-135 à l'ESP32.....	44
<b>Figure 39:</b> Schéma de branchement de capteur MQ-4 à l'ESP32.....	45
<b>Figure 40:</b> Schéma de branchement de capteur MQ-3 à l'ESP32.....	46
<b>Figure 41 :</b> Schéma de branchement de capteur MQ-2 à l'ESP32.....	47
<b>Figure 42:</b> Schéma de branchement de capteur DHT11 à l'ESP32 .....	48
<b>Figure 43:</b> Schéma de branchement de capteur BMP280 à l'ESP32 .....	48
<b>Figure 44:</b> Schéma de branchement DE L'afficheur à l'ESP32.....	49
<b>Figure 45:</b> Circuit de branchement de tout le system sur logiciel fritzing .....	50
<b>Figure 46:</b> Schéma de réalisation du détecteur d'un système multi-gaz .....	51
<b>Figure 47:</b> Circuit électrique de notre carte de commande .....	52
<b>Figure48:</b> Image réel de notre carte électronique.....	53
<b>Figure 49 :</b> Organigramme du fonctionnement général du programme arduino.....	56
<b>Figure 50:</b> Organigramme de la fonction «calibration » .....	58
<b>Figure 51 :</b> Organigramme de la fonction « mesure » .....	59
<b>Figure 52 :</b> a) courbe MQ-135 .....	60
<b>Figure 52 :</b> b) courbe MQ-4 .....	60
<b>Figure 52 :</b> c) courbe MQ-3 .....	61
<b>Figure 52 :</b> d) courbe MQ-2 .....	61
<b>Figure 53 :</b> a) courbe MQ-135 .....	62
<b>Figure 53:</b> b) courbe MQ-4 .....	62
<b>Figure 53:</b> d) courbe MQ-2 .....	63
<b>Figure 53:</b> c) courbe MQ-3 .....	63

## Table des tableaux

<b>Tableau 01</b> : Récapitulatif des méthodes d'analyses de gaz .....	10
<b>Tableau 02</b> :Les performances de différents types de capteur de gaz.....	18
<b>Tableau 03</b> : La connexion de capteur MQ-135 à ESP32.....	44
<b>Tableau 04</b> : La connexion de capteur MQ-4 ESP32.....	45
<b>Tableau 05</b> : La connexion de capteur MQ-3 à ESP32.....	46
<b>Tableau 06</b> : La connexion de capteur MQ-2 à ESP32.....	47
<b>Tableau 07</b> : La connexion de capteur DHT11 à ESP32 .....	48
<b>Tableau 08</b> : La connexion de BMP280 à l'ESP32.....	49
<b>Tableau 09</b> : La connexion de L'afficheur à l'ESP32.....	50

## Liste des abréviations

UV : Ultraviolet.

eV : Électronvolt.

C.à.d. : C'est-à-dire.

MOX : Oxyde métallique.

MOS: Metal Oxid Semi-conducteur

Ppm : partie par million.

Ppb : partie par milliard (part per billion).

GASFET: Gas Field Effect Transistor.

S.C: Semi-conducteur.

Rs/Ro : Rapport de résistance du capteur.

Ro : Résistance du capteur sous gaz cible aux conditions de test

Rs : Résistance du capteur.

E /S : entrées/sorties.

# Introduction Générale

Ces dernières années ont été marquées par des chiffres alarmants en matière de pollution, attribuables principalement aux émissions des installations de chauffage, des centrales thermiques, des industries, des véhicules à moteur conventionnels (à l'exception des véhicules électriques) et de l'agriculture.

Ainsi, la demande pour des systèmes de détection de gaz performants et de contrôle de la qualité de l'air s'intensifie dans divers secteurs. Cette nécessité se manifeste notamment dans les équipements domestiques, la surveillance environnementale, les industries agroalimentaires et pharmaceutiques, ainsi que dans le secteur automobile.

Ce domaine de recherche souffre malheureusement d'un manque d'applications environnementales, mais au cours des dernières années des études importantes traitent les différentes technologies de détection de gaz ainsi que l'évaluation des concentrations. Cette apparition est née suite à la nécessité de la détection des gaz dans l'environnement industriel (chimique, pétrochimique, agroalimentaire, pharmaceutique ...), la sécurité dans les locaux à usage domestique, les lieux publics et les problèmes liés à la pollution atmosphérique.

L'objectif de ce projet est donc de développer un système multi-capteurs basé sur les capteurs semi-conducteurs MQxxx de Hanwei, capable de mesurer précisément la concentration des gaz dans l'échantillon analysé. Ce présent document s'articulera autour de trois chapitres :

Chapitre 1 : Ce chapitre sera consacré à une revue bibliographique sur les méthodes d'analyse des gaz, la présentation des différents types de capteurs de gaz (avec avantages et inconvénients), ainsi que la description des capteurs de gaz à semi-conducteurs tels que le dioxyde d'étain (SnO<sub>2</sub>).

Chapitre 2 : Ce chapitre traitera de la conception du système. Il présentera les différentes parties, notamment la carte à microcontrôleur pour la partie commande-contrôle (avec une étude détaillée de sa construction et de son principe de capteurs de gaz M pour la partie acquisition (avec les caractéristiques techniques relatives à la gamme de mesure). Cela inclura la représentation de la partie matérielle et la partie logicielle.

Chapitre 3 : Ce chapitre détaille les étapes de réalisation du système multi-gaz, ainsi que les tests réalisés pour valider son fonctionnement.

Système polyvalent de détection de gaz : capteurs pour collecte et traitement précis des concentrations, transmission en temps réel via Wi-Fi pour l'Internet des objets.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les capteurs de gaz**

## I.1 Introduction :

En 1777, l'avènement de la théorie des gaz par Lavoisier marqua un tournant majeur dans l'histoire de la chimie. Il démontra brillamment que l'air, considéré auparavant comme un élément simple, était en fait composé de deux gaz distincts : l'oxygène, crucial pour la combustion et la respiration, et l'azote, un gaz inerte. Ce fut le début d'une ère de découverte et d'exploration dans le domaine de l'analyse des gaz.[16]

Plus de deux siècles se sont écoulés depuis lors, et au fil du temps, des méthodes d'analyse des gaz de plus en plus sophistiquées ont été développées. Des techniques telles que la chromatographie en phase gazeuse et la spectrométrie de masse ont émergé, permettant une analyse précise et détaillée de la composition des gaz.

Dans ce chapitre, nous explorerons en profondeur ces différentes méthodes d'analyse, ainsi que les divers capteurs de gaz utilisés pour détecter et mesurer la présence de gaz dans l'atmosphère.

## I.2 Définitions des odeurs :

Une odeur est une émanation volatile perçue par l'odorat. Elle peut être agréable ou désagréable, forte ou légère, et peut provenir de différentes sources telles que des aliments, des fleurs, des animaux, des produits chimiques, etc. Les odeurs peuvent également être associées à des parfums ou des cosmétiques parfumés.

### I.2.1 Les caractéristiques des odeurs:

Les odeurs ont des caractéristiques qui sont communes :

- des substances de composition chimique similaire ou différente peuvent avoir une même odeur.
- la nature et la force de l'odeur peuvent varier à la dilution de produit.
- l'odeur forte domine toujours les odeurs faibles.
- le mélange de deux odeurs de même force produit une combinaison, dont l'un, ou les deux peuvent être difficiles à reconnaître.
- l'individu perd rapidement sa conscience de la sensation à l'exposition à une odeur d'intensité constante. Et il ne le remarque que lorsque l'intensité change.
- la cause d'une plainte est souvent une odeur inconnue.
- l'odeur voyage sous le vent.
- la personne peut sentir une odeur à distance.
- plusieurs animaux ont un sens de l'olfaction plus aigu que l'homme.

### I.2.2 Paramètres des odeurs :

Pour quantifier une odeur, il y a plusieurs paramètres qui dépendent généralement de l'être humain le seuil de détection, l'intensité, la tonalité hédonique et la caractérisation d'odeur.

- **le seuil de détection** : est la plus basse concentration de l'odeur, qui peut être détectée par un certain pourcentage de la population (généralement 50%). Cette concentration correspond à une unité de l'odeur;
- **l'intensité** : c'est une force liée à la concentration de l'odeur. Elle est divisée en catégories allant de « non perceptible » à « extrêmement fort »;
- **la tonalité hédonique** : c'est le degré de satisfaction associé à la perception d'une odeur. Cette mesure dépend d'expérience antérieure et des émotions ressenties d'une personne lors de la perception d'une odeur;
- **la caractérisation** : c'est fondamentalement ce que l'odeur sent. Le caractère d'une odeur peut varier avec intensité. Par exemple, le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) a une odeur irritante et piquante. Il est difficile à évaluer ce paramètre.

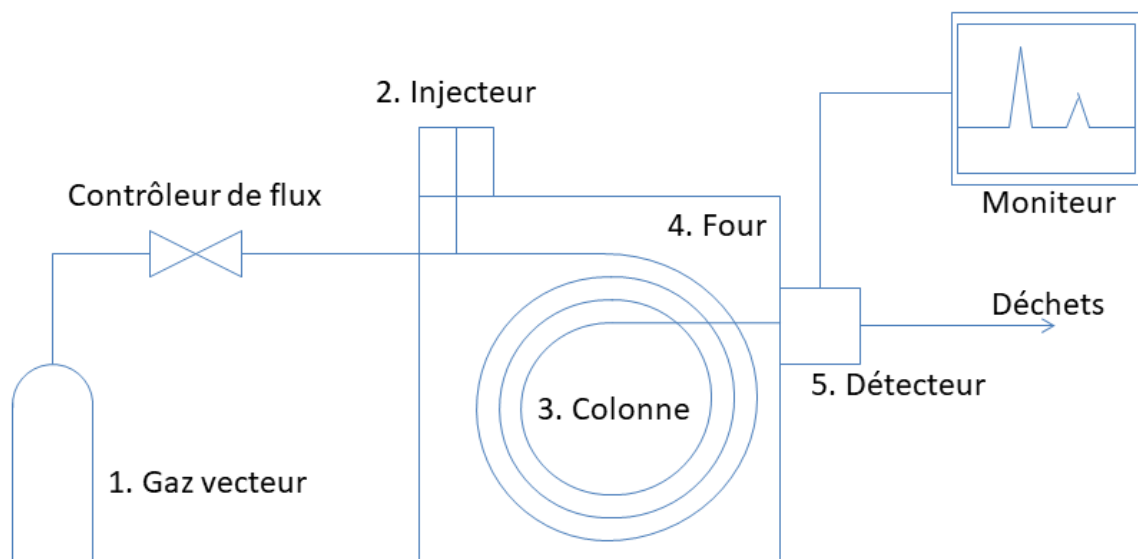
### I.3 Méthode d'analyse des gaz :

Elle existe plusieurs méthodes d'analyse des gaz, parmi ces méthodes on peut citer :

#### I.3.1 Chromatographie en phase gazeuse :

La chromatographie en phase gazeuse est une technique qui a été développée par A.J.P MARTIN et R.L.M SYNGE, qui ont eu le prix du Nobel de chimie en 1952 . La CPG est une technique qui permet de séparer des molécules d'un mélange très complexe de nature très divers (composé gazeux ou susceptible d'être vaporisés par chauffage sans décomposition).

Le mélange à analyser est vaporisé à l'entrée d'une colonne qui referme une substance active solide ou liquide appelée phase stationnaire, puis il est transporté à travers celle-ci à l'aide d'un gaz porteur (gaz vecteur). Les différentes molécules du mélange vont se séparer et sortir de la colonne les unes après les autres, après un certain laps de temps qui est fonction de l'affinité de la phase stationnaire avec ces molécules. La figure (01) suivante montre le schéma d'un chromatographe [1].



**Figure 01** : Schéma d'un chromatographe [1]

### I.3.2 Spectrométrie de masse :

La spectrométrie de masse est une technique analytique permettant de séparer les atomes ou les molécules sous forme d'ions suivant leur masse, dans le but de déterminer la masse moléculaire et d'identification de structure (bibliothèque de spectres, fragmentation). Elle est utilisée dans divers domaines tels que chimie organique, pharmaceutique, biochimie, médical (analyse), géologie, archéologie et environnement (qualité de l'air, l'eau...etc.).[2]

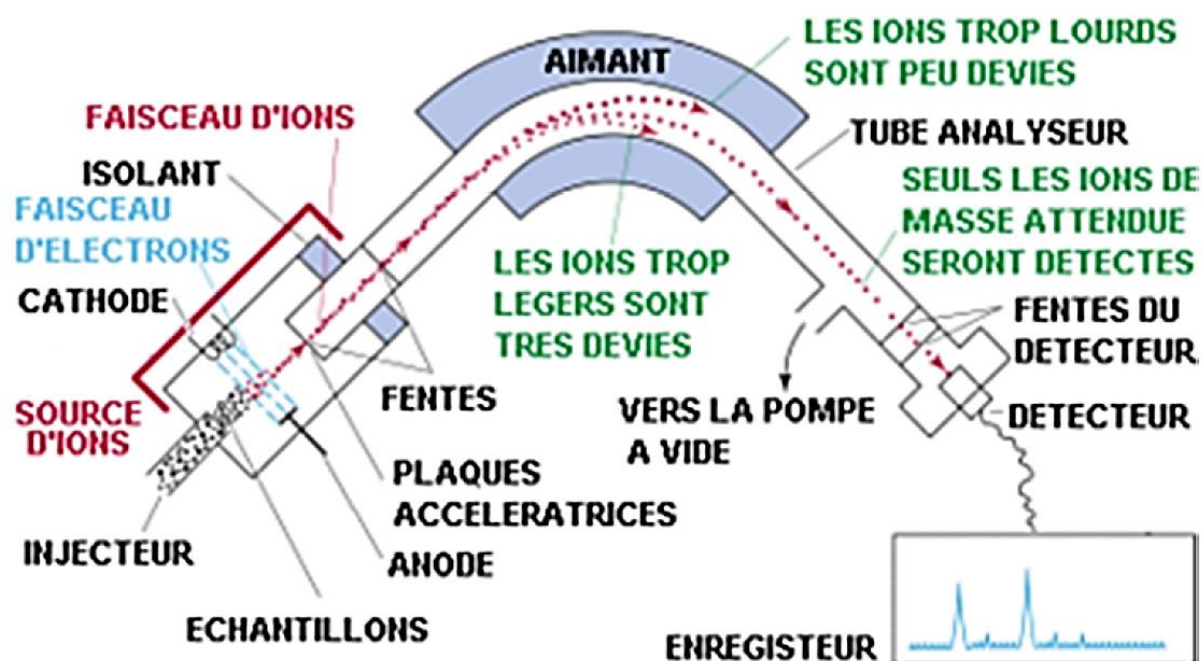


Figure 02 : Spectrométrie de masse [2]

### I.3.3 Spectrométrie d'absorption :

C'est une méthode de spectroscopie électromagnétique, son objectif est d'extraire des informations à partir des spectres obtenus, en mesurant l'intensité du rayonnement électromagnétique qu'elle absorbe à des longueurs d'ondes différentes. Grâce à la loi de Beert Lambert on peut savoir de quel spectre s'agit-il. [14]

### I.3.4 Méthode colorimétrique :

Cette méthode est déjà utilisée dans les premiers détecteurs de gaz.

Dans un tube détecteur, on fait circuler le gaz à analyser au contact d'un ou plusieurs réactifs et on déduit la composition du gaz en fonction de la couleur qui s'est développée. La concentration du gaz est proportionnelle à la longueur de la coloration, figure 03 présente un tube réactif .

Les avantages de cette méthode sont sa simplicité de mise en œuvre grâce à un équipement peu encombrant et peu coûteux. Par contre, la précision de la mesure est mauvaise (l'erreur est de l'ordre de 30 %).



Figure 03 : Un tube réactif. [15]

### I.3.5 Méthode olfactométrique :

Cette méthode ne s'applique qu'aux gaz odorants. Le gaz à analyser doit être tout d'abord dilué par un gaz inodore, puis présenté à un jury. Chaque personne du jury indique si elle perçoit ou non l'odeur de mélange.

La figure 04 présente un jury de nez.



**Figure 04** : Un jury de nez en train d'effectuer un test d'olfactométrie

### I.3.6 Méthode thermique :

#### I.3.6.1 Catharométrie :

Cette technique est basée sur la mesure de conductivité thermique du milieu contenant le gaz à analyser. Un matériau chauffé par effet de joule se stabilise à une température qui dépend de la puissance électrique fournie et des échanges thermiques avec le milieu gazeux. La mesure permet alors de détecter la présence d'éventuels gaz autres que ceux de l'air. Cette méthode n'est pas sélective mais, elle est bien adaptée à la mesure de la concentration d'un gaz donné.

#### I.3.6.2 Combustion catalytique :

Ce capteur n'est utilisable que pour la détection de gaz combustible. Il est basé sur le fait de l'oxydation de gaz par l'échauffement d'un matériau catalyseur de combustion qui entraîne un changement de la résistance électrique proportionnel à la concentration de gaz. Ce type de capteur est moins coûteux mais, il n'est pas sélectif.

### I.3.7 Méthode électronique :

#### I.3.7.1 Oxyde semi-conducteur :

Cette méthode est basée sur le pouvoir oxydo-réducteur des gaz.

Le matériau support de la réaction d'oxydoréduction est un oxyde métallique semi-conducteur ( $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ...) de type p ou n utilisé pour ses propriétés vis à vis du gaz. Les réactions d'oxydoréduction, ou simplement l'adsorption à la surface, vont changer la résistivité du matériau. Ce dernier est chauffé et on mesure la variation de sa résistance qui varie selon la concentration des gaz.

#### I.3.7.2 Mesure des composés organiques par ionisation de flamme :

Lorsqu'on brûle des composés organiques dans une flamme air-hydrogène, ils émettent des ions. On collecte ces ions dans un détecteur (analyseur d'hydrocarbure totaux) à ionisation de flamme. La quantité d'électricité correspondante est alors mesurée au moyen d'un électromètre.

#### I.3.7.3 Mesure des composés organiques par photo ionisation :

C'est le même principe que l'ionisation de flamme, la différence ce que l'ionisation se fait par rayonnement UV avec des photons d'énergie voisine de 10 eV.

La figure (05) présente un détecteur à ionisation de flamme.

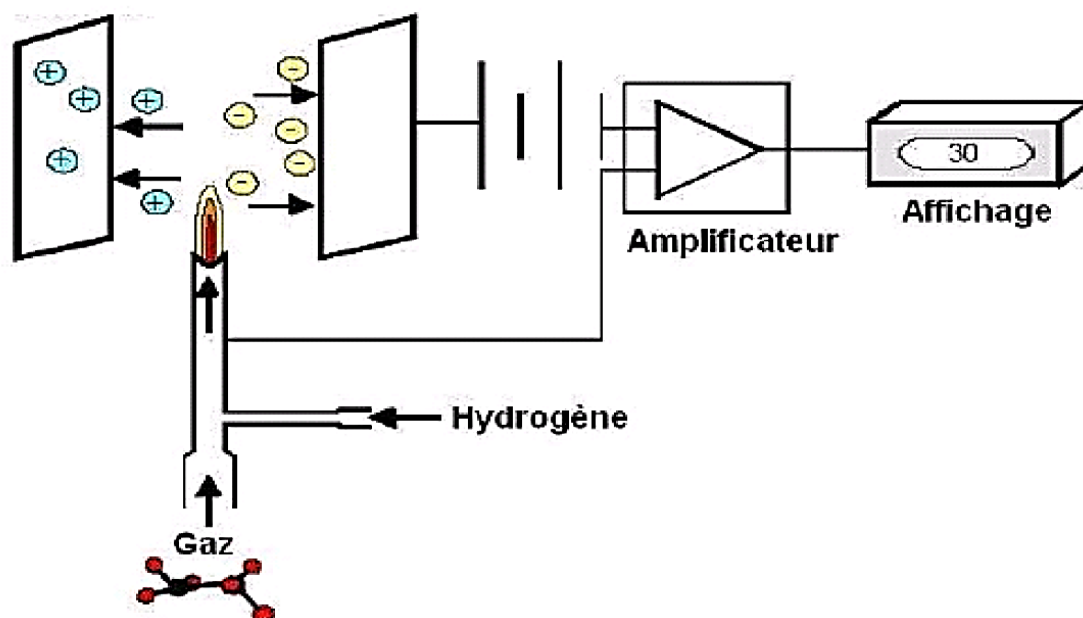


Figure 05 : Détecteur à ionisation de flamme.[15]

**I.3.8 Autres méthodes :**

Les méthodes ci-dessous sont spécialisées dans l'analyse de gaz individuels. Voici une brève description de leurs principes de fonctionnement.

**I.3.8.1 Chimiluminescence :**

Cette méthode permet la mesure des NO<sub>x</sub>. Son principe repose sur la production d'énergie lumineuse (dans le domaine proche infrarouge) résultant d'une réaction chimique avec l'ozone. L'intensité de la radiation détectée est directement liée à la concentration de NO<sub>x</sub>, suivant la loi de Beer-Lambert.

**I.3.8.2 Fluorescence UV :**

Cette méthode est principalement employée pour mesurer la concentration de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) dans l'air. Son principe repose sur l'émission d'énergie lumineuse qui se produit lorsqu'une molécule, excitée par un rayonnement UV, réémet une radiation caractéristique en revenant à son état initial. Tout comme la chimiluminescence, l'intensité de la radiation de fluorescence UV est directement proportionnelle à la concentration de SO<sub>2</sub>, suivant la loi de Beer-Lambert.

**I.3.8.3 Paramagnétisme :**

Cette méthode est spécifiquement conçue pour mesurer la présence d'oxygène, car celui-ci est le seul gaz présentant une sensibilité paramagnétique élevée (contrairement à des gaz comme NO, NO<sub>2</sub>, etc.). Les molécules d'oxygène sont attirées vers la région où le champ magnétique est le plus intense. La force du courant électrique est directement proportionnelle à la concentration en oxygène.

**Récapitulatif :**

La précision de la mesure varie en fonction de la méthode utilisée. Pour des performances élevées, telles que la précision, la sensibilité et la sélectivité, les choix les plus appropriés sont la chromatographie en phase gazeuse et la spectrométrie de masse. En revanche, pour la simple détection, des méthodes plus abordables et faciles à utiliser sont privilégiées, comme les tubes colorimétriques et les capteurs MOX.

La plupart de ces techniques sont destinées à être utilisées en laboratoire et nécessitent un équipement plus ou moins complexe. Les caractéristiques des différentes méthodes sont résumées dans le tableau 01.

Technique utilisée constructeurs	Gaz détecté	Minimum détectable	Temps de réponse	Avantages	Inconvénients	Principaux constructeurs
Chromatographie en phase gazeuse	Tous produits (selon détecteur et colonnes)	<< 1 ppm ppb à ppm	5 à 40 min	Sensible, spécifique	Étalonnage, peu portable	<b>HewlettPackard, Chromato-Sud</b>
Spectrométrie de masse	Tous composés sous forme gazeuse	ppb à ppm	1 min	Sélective, sensible quantification parfaite	Matériel lourd, interprétation de spectres	<b>Agilent MKS</b>
Absorption infrarouge	CO, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , HCl, HC	Ppm	1 min	Non dispersif	Interférence avec vapeur d'eau	<b>Modicon (Arecol) Kimo Ados</b>
Absorption visible/UV	CO, SO <sub>2</sub> , NO, O <sub>3</sub>	1 ppb	1min	Meilleure spécifié que IR	Interférence en absence de traitement, onéreux	<b>Megatec, Seres</b>
Cellules électrochimiques	Gaz oxydants/ réducteurs	100 ppm	20s à 100 S	Bonne sélectivité	Interférence possible, faible reproductibilité	<b>MSA Dräger</b>
Combustion catalytique	Gaz combustibles	0 à 100 % de LIE	10 s	Robuste	Non sélective	<b>GfG, MSA</b>
Tubes et badges colorimétriques	Tous gaz (suivant réactif)	10 <sup>-6</sup> v/v	1 min	Temps de réponse court bonne répétitivité	Faible précision, sélectivité variable	<b>Dräger Gastech</b>
Capteurs MOX	Gaz oxydants et réducteurs	Suivant gaz	10 s	Prix faible	Faible sélectivité sensible à l'humidité	<b>Figaro MiC,S AppliedSensor, FIS</b>

Paramagnétisme	Oxygène	$5.10^{-3}$ à 1 v/v	10s à 1 min	<i>Robuste, petite taille grande durée de vie réponse linéaire,</i>	Sensibles aux gaz diamagnétiques	<b>Systech</b>
Chimiluminescence	NO, NO <sub>2</sub>	1 ppb	Très spécifique	Maintenance	Étalonnage délicat	<b>Seres</b>
Fluorescence	SO <sub>2</sub>	$10^{-8}$ v/v	1min	Peu d'interférence	Spécifique SO <sub>2</sub>	<b>Fondis electronic</b>
Olfactométrie	Gaz odorants	Selon gaz	1 heure	Simple	Personnel nombreux	

**Tableau 01** : Récapitulatif des méthodes d'analyses de gaz. [3]

#### I.4 Capteur de gaz :

##### I.4.1 Définition de capteur de gaz :

Un capteur de gaz est défini comme un composant dont au moins une de ses propriétés physiques change quand il est soumis à un changement d'environnement gazeux. D'une manière générale, un capteur est composé de deux éléments principaux :

- **L'élément sensible** : Qui est le cœur du capteur, sur lequel se passe la réaction avec l'espèce gazeuse.
- **Tranducteur** : Qui est le dispositif permettant la conversion du résultat de la réaction entre le gaz et l'élément sensible en un signal mesurable (signal électrique, optique, ou acoustique).

##### I.4.2 Principales familles de capteur de gaz :

Tous les capteurs de gaz être classés en fonction de leur principe de détection, basé sur un phénomène physique ou chimique, ils peuvent être aussi classés par la méthode de mesure effectuée.

Pour cela nous allons séparer les capteurs de gaz (chimique) en deux grands groupes :

###### I.4.2.1 Les capteurs de gaz à mesure direct (simple) :

La réaction chimique affecte directement une mesurable caractérisés électriquement par une résistance, un potentiel, un courant ou bien une capacité. Parmi ces capteurs on peut citer :

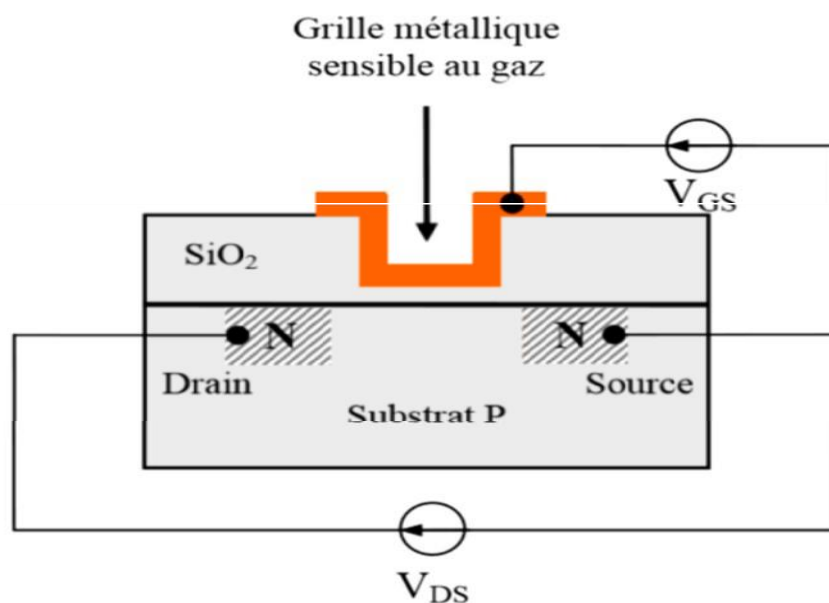
**a) Les capteurs à transistors à effet de champ (GASFET) :**

La structure de ce type de capteurs de gaz est la même d'un transistor MOS à effet de champs sauf que la grille du FET est constituée d'un oxyde métallique sensible au gaz et sur laquelle une membrane sensible à la substance à détecter est intégrée (voir figure 6) [6].

En effet, lors de l'absorption, l'interaction de l'oxyde métallique avec l'espèce à détecter provoque une modification de la tension de seuil du FET [6].

Cette modification induit une variation de la concentration de porteurs au niveau du canal du transistor et de sa conductance [7].

La structure de ce capteur est illustrée dans La figure 6:



**Figure 06 :** a) Un capteur GASFET.

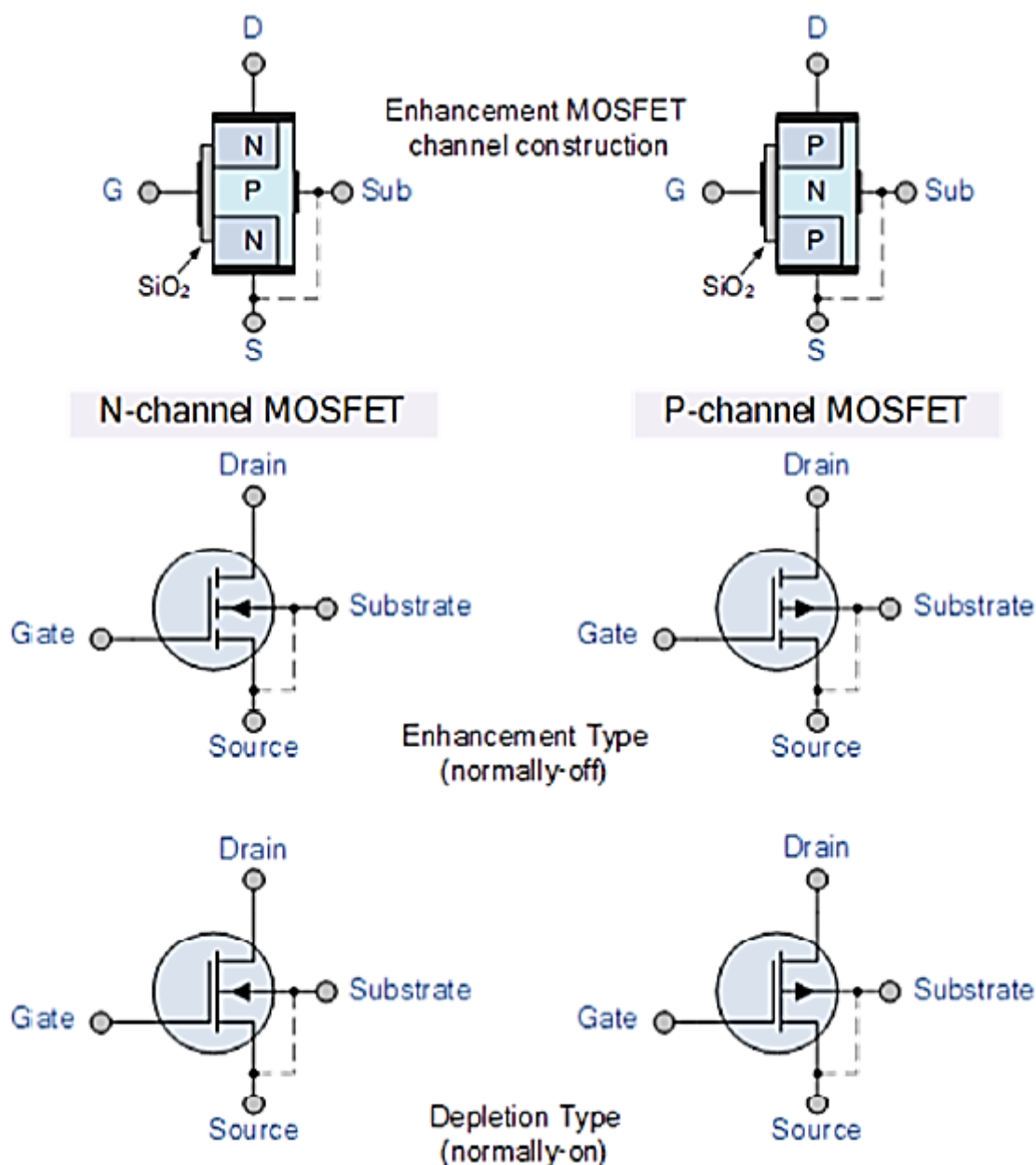


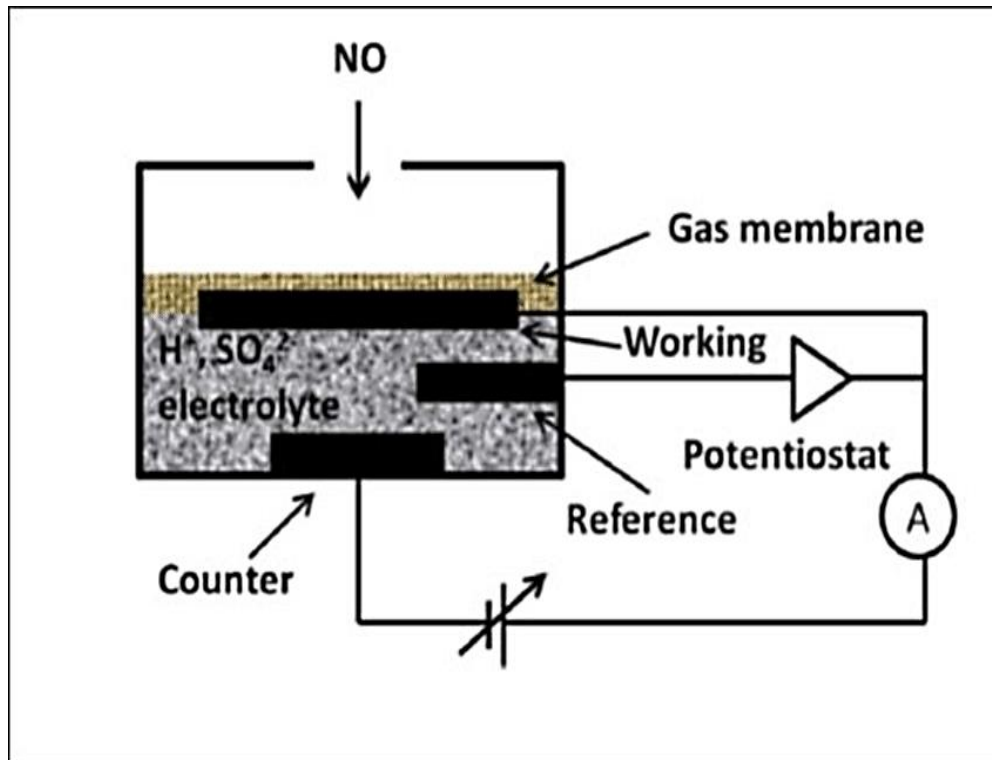
Figure 06 : b) Transistor MOSFET.

### b) Les capteurs électrochimiques :

La structure la plus simple de ce type des capteurs de gaz est composée d'une membrane semi-perméable jouant un rôle de barrière de diffusion, un électrolyte et deux électrodes entre lesquelles est appliquée une différence de potentiel [6].

Le principe de fonctionnement est basé sur une réaction d'oxydoréduction. L'absorption du gaz à détecter déclenche une réaction électrochimique spécifique, qui provoque une force électromotrice due au transfert de charge entre l'espèce gazeux et la cellule [6].

Ce type de capteur est très sensible et possède une bonne sélectivité aux gaz. Cependant, leur durée de vie est limitée et la mesure dépend de l'historique du capteur.



**Figure 07 :** Schéma d'un capteur électrochimique. [5]

Électrochimique spécifique, qui induit une force électromotrice liée au transfert de charge entre le gaz et la cellule.

Ces capteurs sont sensibles et possèdent une bonne sélectivité au gaz, cependant leur durée de vie est limitée. Le schéma d'un capteur électrochimique est illustré dans la figure (07) ci-dessous.

### C) Les capteurs à base d'oxyde métallique :

Les capteurs de gaz à base d'oxyde métallique (MOX) ont été développés par SEIYAME et TAGUCHI dans les années soixante. Ces capteurs fonctionnent en températures élevée (entre 300°C et 500°C). Ils fonctionnent par variation de la conductance de la couche semi-conductrice en présence d'un gaz qui est défini par la relation suivante :

$$G = \sigma \frac{S}{L} \quad \text{avec :}$$

**G** : conductance en Siemens (S)

**$\sigma$**  : Conductivité en Siemens/mètre (S/m)

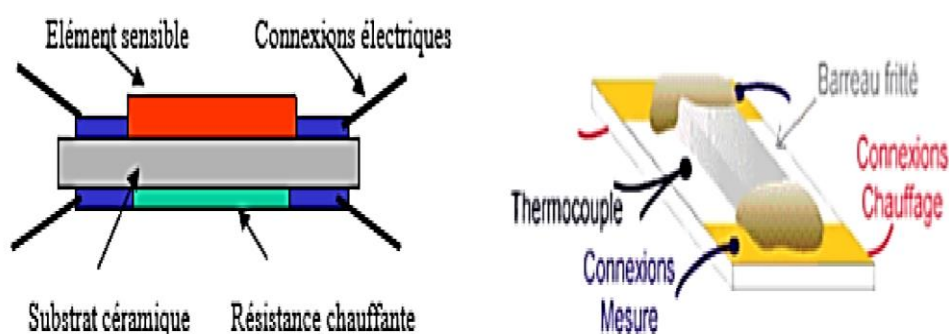
**S** : Surface en mètre carré (m<sup>2</sup>)

$L$  : distance entre les plaques en mètre (m ).

Les oxydes métalliques se distinguent en deux grandes catégories : les types N, où la conduction est assurée par les électrons, et les types P, où elle est assurée par des trous. Les oxydes de type N voient leur conductivité diminuer avec l'augmentation de la pression partielle d'oxygène. Ils sont préférés dans de nombreux capteurs de gaz en raison de leur stabilité et de leur capacité à favoriser la chimisorption, une étape clé dans l'adsorption des gaz.

En revanche, les oxydes de type P montrent une conductivité croissante avec l'augmentation de la pression partielle d'oxygène. Bien qu'ils soient moins stables en raison de leur propension à échanger des atomes d'oxygène avec l'air, ces capteurs sont utilisés dans des applications spécifiques, notamment comme capteurs d'oxygène à haute température.

La Figure 08 ci-dessous illustre un exemple de capteur de gaz basé sur un oxyde métallique, mettant en évidence son architecture et son fonctionnement. Cette représentation souligne l'importance de sélectionner le bon type d'oxyde métallique en fonction des exigences spécifiques de chaque application.



**Figure 08 :** Capteur de gaz à base d'oxyde métallique: matériau sensible déposé sur un substrat chauffant.

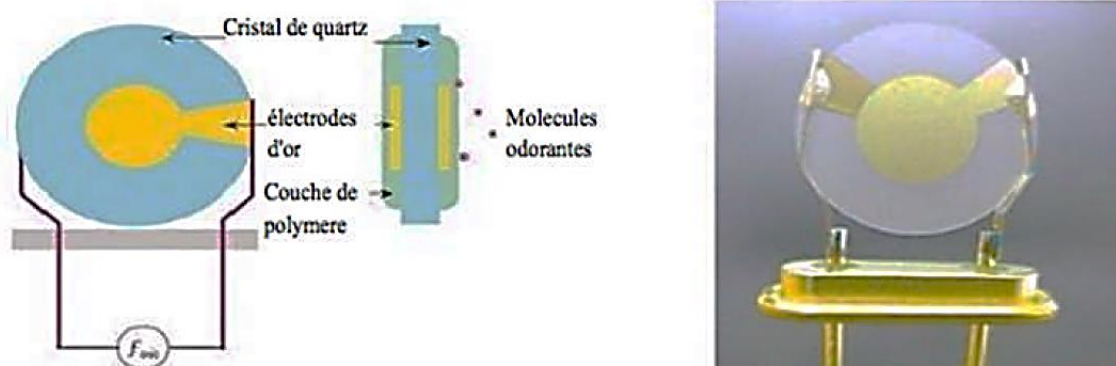
#### I.4.2.2 Les capteurs de gaz à mesure indirecte (complexe) :

La réaction chimique n'affecte pas une caractéristique électrique mesurable directement et on aura besoin de faire appel à un transducteur (rôle d'interface) pour convertir le phénomène détecté en un signal électrique. Parmi ces capteurs on peut citer :

##### a) Les capteurs à microbalance de quartz :

Il s'agit de dispositifs résonnants à base d'un cristal de quartz soumis à une oscillation rapide de 500 KHz à 3 GHz. Le principe de fonctionnement repose sur la variation de la fréquence de résonance du matériau sensible quand une espèce s'adsorbe à sa surface [4]. Ce type de capture est utilisé pour détecter les composés organiques volatiles. Ce capteur est constitué d'un

matériau sensible (cristal de quartz) sous la forme d'un disque, utilisé dans un oscillateur (voir la figure 9) [6]



**Figure 09** : Structure d'un capteur à microbalance de quartz. [6]

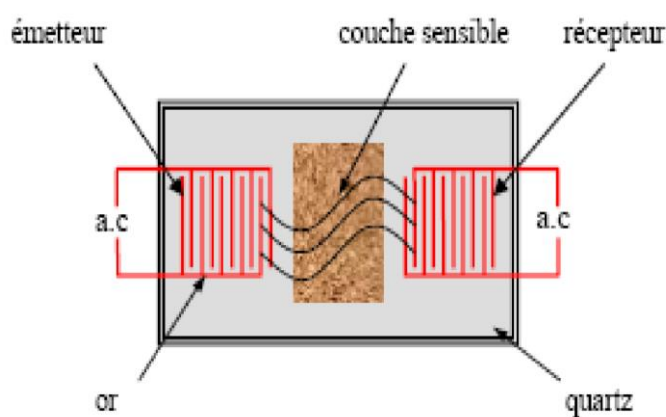
### b) Les captures à onde acoustique de surface :

Ce capteur est constitué d'un matériau piézo-électrique (quartz) sur lequel deux paires d'électrodes interdigitées sont déposées [6].

L'une des électrodes est utilisée pour l'excitation et joue le rôle d'un émetteur, alors que l'autre a pour mission de la réception et la détection des ondes après propagation [6].

Entre ces deux électrodes, une couche sensible est déposée sur le trajet de l'onde. Cette couche permet l'adsorption du gaz à détecter (voir figure 10) [6].

Le principe de fonctionnement de ce capteur est similaire à celui des capteurs à microbalance de quartz. En effet, l'adsorption de l'espèce à détecter par la couche sensible modifie la propagation de l'onde et par conséquent sa fréquence [6,7].



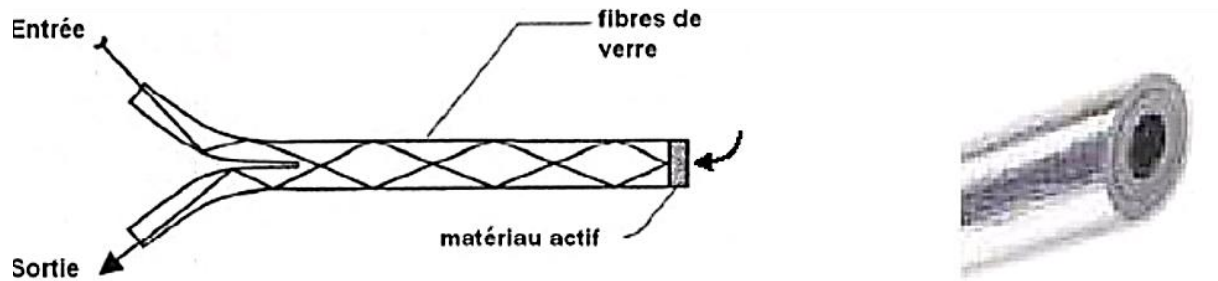
**Figure 10** : Structure d'un capteur à ondes acoustiques de Surface. [6]

### C) Les capteurs à fibre optique :

Les deux principaux types de capteur de gaz à fibres optiques sont : les capteurs extrinsèques et les capteurs intrinsèques [7].

Pour le capteur extrinsèque, l'élément sensible se trouve à l'extrémité de la fibre optique, tandis que dans le cas du capteur intrinsèque, la surface de la fibre optique constitue elle-même l'élément sensible [7].

Le principe de fonctionnement est basé sur la modification de la propagation du rayonnement. En effet, la lumière dans la zone de mesure subit une modification en présence de la substance à détecter [7]



**Figure 11** : Capteur a fibre optique. [7]

L'avantage de ces capteurs est qu'ils offrent la possibilité d'obtenir une mesure dans des environnements difficiles à accéder ou perturbés [6].

#### I.4.3 Caractéristique d'un capteur de gaz :

Les performances des capteurs sont souvent différentes les uns des autres selon plusieurs paramètres à savoir :

##### I.4.3.1 Sensibilité :

La sensibilité d'un capteur se réfère à sa capacité à détecter les variations du signal d'entrée en produisant une variation correspondante du signal de sortie. Elle est souvent considérée comme la caractéristique la plus importante d'un capteur. Cependant, dans le cas des capteurs à base de semi-conducteur, la sensibilité n'est généralement pas la principale préoccupation lors de leur utilisation.

Pour calculer la sensibilité on utilise l'équation suivante :  $S = DR/D[\text{GAZ}]$

Avec :

**S** : sensibilité du gaz (mV/ °C)

**C** : concentration du gaz ( ppm )

**R** : Réponse de capteur (sortie du capteur, résistance ou conductance, ...)

#### I.4.3.2 Stabilité :

La stabilité d'un capteur fait référence à sa capacité à maintenir ses performances intactes sur une période prolongée. Cependant, le vieillissement du capteur peut limiter son utilisation à long terme. Diverses solutions sont envisagées pour pallier ce problème, notamment en proposant un traitement préalable de la couche sensible.

#### I.4.3.3 Sélectivité :

La sélectivité est essentielle pour détecter un gaz spécifique au sein d'un mélange de gaz. Cependant, les capteurs à base d'oxyde métallique rencontrent actuellement des défis majeurs en termes de sélectivité. Pour remédier à cette lacune, de nombreuses méthodes sont en cours d'étude et de développement.

#### I.4.3.4 Temps de réponse :

Le temps de réponse est défini comme étant le temps nécessaire pour que la réponse du capteur atteigne 90% de son amplitude maximale lorsqu'il est exposé au gaz.

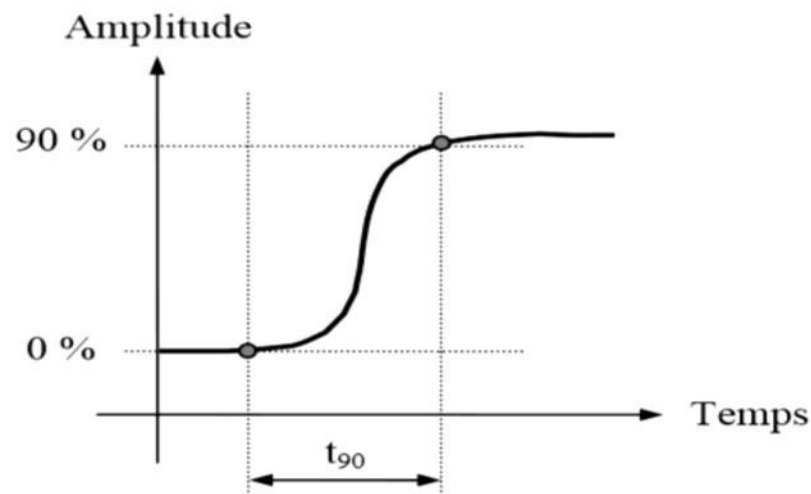


Figure 12: Courbe du temps de réponse d'un capteur.

#### I.4.3.5 Température de fonctionnement :

Les processus d'adsorption et de désorption des molécules de gaz à la surface du capteur sont sensiblement influencés par sa température de fonctionnement. Ainsi, pour assurer une réversibilité optimale de ces phénomènes, les capteurs MOX sont conçus pour fonctionner à

des températures élevées, généralement comprises entre 300°C et 500°C. Cependant, la baisse de la température de fonctionnement permet de réduire la consommation d'énergie électrique. C'est pourquoi des recherches sont actuellement menées pour développer des capteurs fonctionnant à des températures plus basses, voire à température ambiante.

#### I.4.4 Comparaison des performances de différents types de capteur :

Le tableau 02 suivant présente les performances de différents types de capteur de gaz.

	CAPTEURS		
Principale caractéristique	Semi-conducteur (MOX, GASFET)	Piézoélectrique (SAW,BAW)	Électrochimique
Sensibilité	Très élevée	Elevée	Elevée
Précision	Bonne	Très bonne	Bonne
Sélectivité	Faible	Très faible	Bonne
Temps de réponse	Très rapide	Rapide	Lent
Stabilité	Très bonne	Bonne	Très bonne
Coût	Faible	Faible	Faible

**Tableau 02 :** Les performances de différents types de capteur de gaz.

D'après ce tableau, on déduit que les capteurs à base des semi-conducteurs sont mieux à utiliser.

#### I.4.5 Capteur semi-conducteur :

##### I.4.5.1 Définition d'un semi-conducteur :

Le S.C a un corps cristallin dont les propriétés de conductibilité sont intermédiaires entre celle des métaux et les isolants.

Le caractère conducteur ou isolants prend sa source dans la structure même des atomes, chaque élément du tableau périodique possède un certain nombre d'électrons qui sont agencés autour d'un noyau. C'est cet agencement sous la forme de couche d'électrons (diffère selon les éléments) qui responsable de la conductivité électrique.

Les électrons d'un atome peuvent avoir plusieurs rôles au sein d'une structure d'atome :

- **Électrons de cœur :** Ceux-ci sont proche du noyau et n'interagissent pas vraiment avec les autres atomes.

- **Électrons de valence** : Ceux-ci sont sur les couches externes de l'atome et permettent de créer des liaisons interatomiques et de former les molécules.
- **Électrons de conduction** : Ceux-ci sont responsable de la circulation du courant électrique.

#### **I.4.6 Capteur oxyde métallique :**

##### **I.4.6.1 Historique :**

L'idée d'utiliser les MOX (composé chimique constitué d'oxygène avec un autre élément chimique moins électronégative que lui) dans la détection de gaz date de 1953 par BARDEEN et BRATTAIN, puis HEILAND en 1954. En 1962 SEIYAMA présentait le premier dispositif de détection utilisant un oxyde métallique tel qu'un film d'oxyde de zinc alors que le japonais TAGUSHI, de la société Figaro Engineering Inc déposa un brevet de fabrication d'un détecteur de gaz à partir du dioxyde d'étain ( $\text{SnO}_2$ ). Cette même société commença alors à commercialiser les capteurs dès 1970.

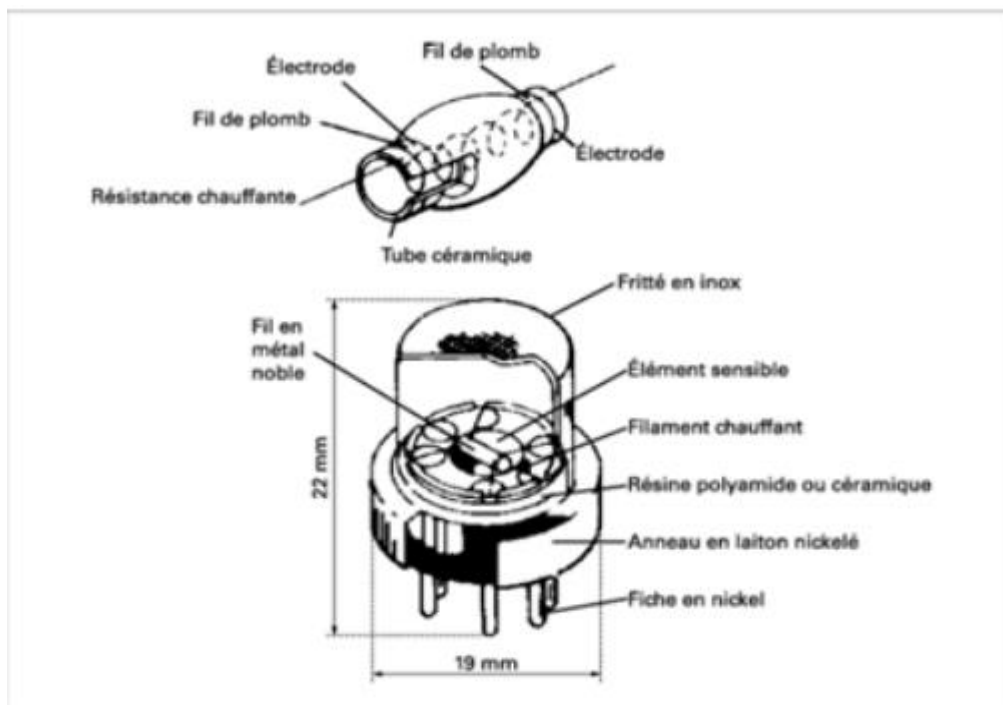
Depuis de nombreux travaux de recherches sont encore entrepris de nos jours autour de ces capteurs, en raison d'améliorer la sensibilité du matériau, ainsi la miniaturisation des dispositifs électroniques associés pour pilotage du capteur et le traitement du signal.

Ces capteurs ont des avantages variés, en particulier une bonne durée de vie et une grande facilité d'utilisation. Les MOX les plus utilisés, outre le dioxyde d'étain  $\text{SnO}_2$ , sont les oxydes de tungstène  $\text{WO}_3$ , de zinc  $\text{ZnO}$  ou de titane  $\text{TiO}_2$ .

##### **I.4.6.2 Structure d'un capteur MOX :**

Les capteurs MOX fonctionnent à température élevée (typiquement entre 300 ils nécessitent une structure comportant une couche sensible associée à un élément de chauffage. La figure (13), présente la première structure, proposée par TAGUSHI (capteur figaro série TGS8xxx).

La couche sensible est déposée sur un tube en céramique poreux de diamètre 1mm et de longueur 3mm. L'élément de chauffage est un fil métallique bobiné à l'intérieure du tube. Les contacts électriques de la couche sensible sont fixés aux deux extrémités du tube avec une colle conductrice.



**Figure 13:** Structure de premier capteur de gaz réalisé par TAGUSHI.

#### I.4.6.3 Mode de fonctionnement :

Un capteur de gaz à base de semi-conducteur est composé d'une partie mesure et d'une partie commande.

La partie mesure concerne les électrodes, ces derniers permettent d'établir un contact électrique avec la couche sensible (S.C type N, S.C type P) afin de mesurer sa conductivité (ou sa résistivité). Elles permettent la conduction des charges du matériau vers le circuit qui récupère le signal (circuit de commande).

#### I.4.6.4 La conductivité :

La détection des gaz basée sur des couches d'oxyde métallique exploite les interactions physico-chimiques qui se produisent à la surface de cette couche. En ce qui concerne la conductivité des semi-conducteurs de type N, où il y a un excès d'électrons libres par rapport aux trous, elle peut être exprimée par l'équation suivante :

$$\sigma = q * n * \mu$$

Avec :

$\sigma$  : représente la conductivité,

$q$  : est la charge de Coulomb,

$n$  : est la densité des porteurs de charge (dans ce cas, les électrons),

$\mu$  : est la mobilité des porteurs de charge (ici, des électrons).

Pour les semi-conducteurs de type P, où il y a un excès de trous par rapport aux électrons libres, la conductivité peut être décrite par :

$$\sigma = q * p * \mu$$

Avec :

$\sigma$  : représente la conductivité,

$e$  : est la charge élémentaire (charge de Coulomb),

$\mu$  : est la mobilité des trous, et  $p$  est la concentration des trous.

#### **I.4.6.5. Interaction Gaz – Solide :**

Les interactions entre les gaz et les solides peuvent être regroupées en quatre catégories distinctes :

**a) Chocs entre les molécules gazeuses et le solide :** Dans ce cas, le matériau ne réagit pas au gaz. Il reste insensible à cette interaction.

**b) Adsorption :** Cette catégorie implique la fixation d'une partie de la phase gazeuse à la surface du solide. L'adsorption peut être subdivisée en deux types :

- **Physisorption :** Les forces d'attraction entre les molécules de gaz et le solide sont de nature physique, telles que les forces de Van der Waals. Ces forces résultent d'interactions électriques de faible intensité entre les atomes ou les molécules.
- **Chimisorption :** Ce phénomène d'adsorption implique des interactions chimiques, où les forces de liaison entraînent un transfert de charge entre l'adsorbat et l'adsorbant.

**c) Réaction :** Cette catégorie décrit l'adsorption du gaz dans le solide, suivie d'une réaction qui transforme le matériau en une nouvelle substance.

**d) Désorption :** Après l'adsorption des molécules gazeuses, cette catégorie implique la libération de ces molécules, transformant ainsi la substance adsorbante en une espèce gazeuse.

#### **I.4.6.6 Rôle de l'oxygène et principe de détection :**

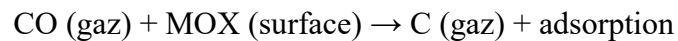
L'oxygène joue un rôle crucial dans la détection des gaz par les MOX (oxydes métalliques). Lorsque les MOX entrent en contact avec l'oxygène, celui-ci peut être adsorbé à leur surface selon deux types d'interactions :

**1. Adsorption physique de l'oxygène :** Les molécules d'oxygène (gaz) se fixent simplement à la surface du MOX (adsorbé) sans réaction chimique.

**2. Adsorption chimique de l'oxygène :** Dans ce cas, les molécules d'oxygène (adsorbé) réagissent avec les atomes du MOX. Cela entraîne un transfert d'électrons libres du réseau du MOX vers les molécules adsorbées, ce qui diminue la conductivité électrique du MOX.

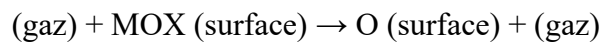
Lorsque le MOX est exposé à d'autres gaz que l'oxygène, tels que les gaz réducteurs ou oxydants, des réactions chimiques peuvent se produire avec les espèces adsorbées, notamment les espèces oxygénées. Ces réactions sont principalement des réactions d'oxydoréduction.

❖ Par exemple, pour un gaz réducteur tel que le CO, la réaction suivante se produit :



Dans ce cas, le nombre de porteurs majoritaires (trous) augmente, ce qui entraîne une augmentation de la conductivité électrique du MOX.

❖ Inversement, pour un gaz oxydant tel que, la réaction suivante se produit :



Dans cette réaction, le nombre de porteurs majoritaires diminue, ce qui entraîne une diminution de la conductivité électrique du MOX.

Dans le cas des semi-conducteurs de type P, où la conduction se fait par des trous, la présence d'un gaz réducteur diminue la conduction, tandis que la présence d'un gaz oxydant l'augmente.

### **I.5 Conclusion :**

Après avoir analysé le comportement de ces capteurs, on remarque que leur conductivité électrique varie en réponse aux modifications de l'environnement gazeux. En conséquence, la mesure de la conductivité est le paramètre principal à surveiller pour les capteurs basés sur des semi-conducteurs, tels que ceux utilisés pour déterminer la concentration d'humidité ou de gaz.

# **Chapitre II**

## **Conception matérielle et logicielle**

## II.1 Introduction :

La conception de notre système multi-gaz est basée sur deux parties complémentaires, la partie matérielle qui représente l'ensemble de ses éléments entre la carte d'acquisition et les capteurs, la deuxième partie la conception du logiciel qui joue un rôle important sur le fonctionnement. Nous allons commencer ce chapitre par la conception matérielle.

## II.2 Description général du système :

La figure ci-dessous nous montre une vue détaillée de tous les éléments qui rentre dans la conception de notre système. Elle est composé d'un ensemble de capteurs de gaz et d'un carte à microcontrôleur, nous avons choisi la carte ESP 32 qui possède plusieurs avantages :

- Un processeur plus rapide et plus puissant que la carte arduino.
- Dispose de module Wifi et Bluetooth intègres.
- Plusieurs broches d'entrées /Sorties.

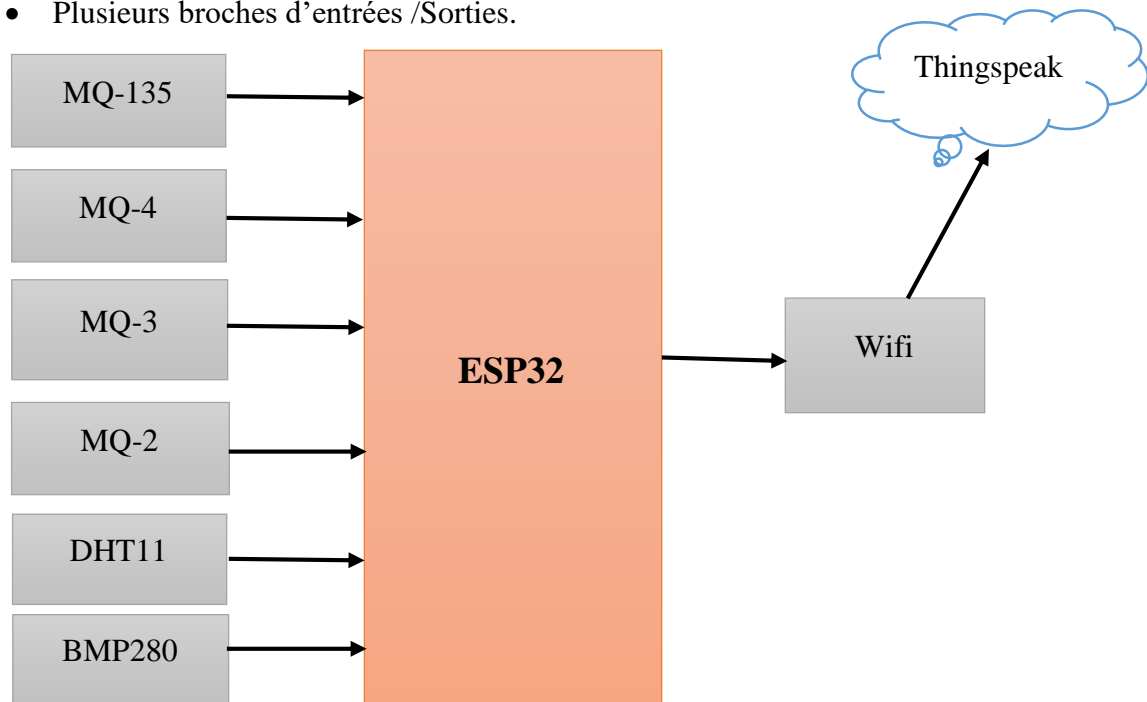


Figure 14 : Schéma synoptique de système.

## II.3 Partie matérielle :

### III.3.1 Représentation des capteurs :

Les capteurs MQ sont des capteurs physicochimiques analogiques permettant de détecter une grande variété de gaz, polluants et fumées dans l'atmosphère : on distingue plusieurs types

#### II.3.1.1 Le Capteur MQ2 :

C'est un capteur semi-conducteur dont la conductivité est faible dans l'air pur. Et en présence du gaz à détecter, la conductivité du capteur augmente avec l'augmentation de la concentration

du gaz. Le capteur MQ2 présente une grande sensibilité à l'éthanol, le propane et à l'hydrogène. Il pourrait également être utilisé pour le méthane et à toute autre vapeur combustible [10].

Le MQ2 est un capteur spécialisé pour la détection de plusieurs gaz (H<sub>2</sub>, GPL, CH<sub>4</sub>, CO, alcool, la fumée, propane et air).



Figure 15: Capture MQ2.

#### II.3.1.1.2 Caractéristiques :

- Alimentation: 5V
- Interface: Analogique
- Plage de mesure: 10 à 10000 ppm
- Sortie: Analogique et digitale (seuil ajustable via potentiomètre)
- Sensibilité: 2 à 20
- Dimensions: 42 x 24 x 34 mm
- Haute sensibilité et temps de réponse rapide
- Courbe caractéristique de sensibilité :

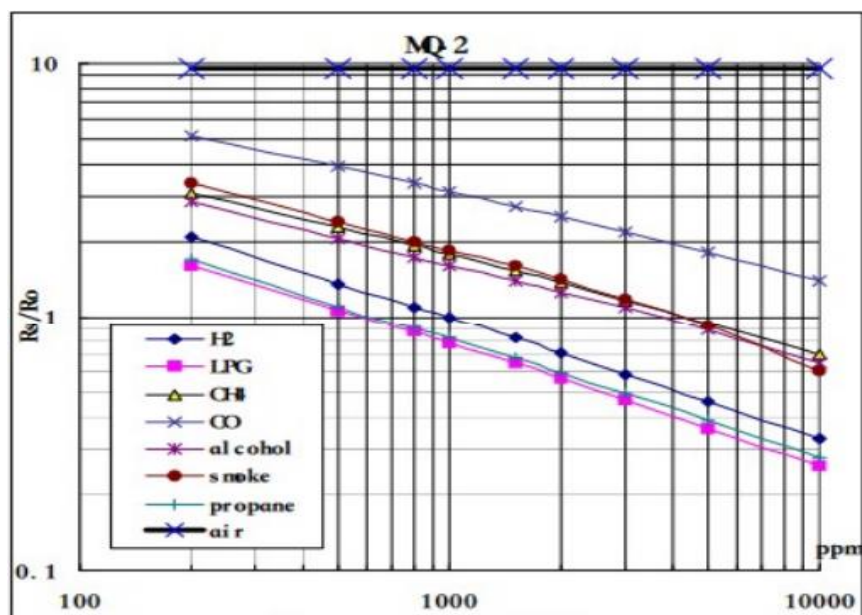


Figure 16 : Les caractéristiques de sensibilité typique de MQ-2 pour plusieurs gaz.

### II.3.1.2 Le Capteur MQ3 :

Le capteur de gaz MQ3 est un capteur de gaz alcoolique qui permet de mesurer la concentration d'alcool dans l'air, à des concentrations allant de 0,05 mg/L à 10 mg/L. Ce capteur est compatible avec les cartes Arduino et Raspberry Pi via une sortie analogique. Il est facile à utiliser et peut être utilisé pour détecter la présence d'alcool dans l'air, par exemple pour un alcooltest.



**Figure 17:** Capture MQ3.

#### II.3.1.2.1 Caractéristiques : [11]

- Alimentation: 5V.
- Interface: Analogique et TTL.
- Plage de mesure: 0.05 mg/L à 10 mg/L.
- Sortie: Analogique et TTL.
- Température de fonctionnement: -10 à 50 °C.
- Consommation: moins de 150 mA à 5V.
- Sensibilité: élevée avec le gaz alcool, le gaz de pétrole liquéfié, le gaz naturel, le gaz de ville et la fumée.
- Durée de vie et stabilité fiable.
- Réponse rapide et haute sensibilité.

➤ Courbe caractéristique de sensibilité :

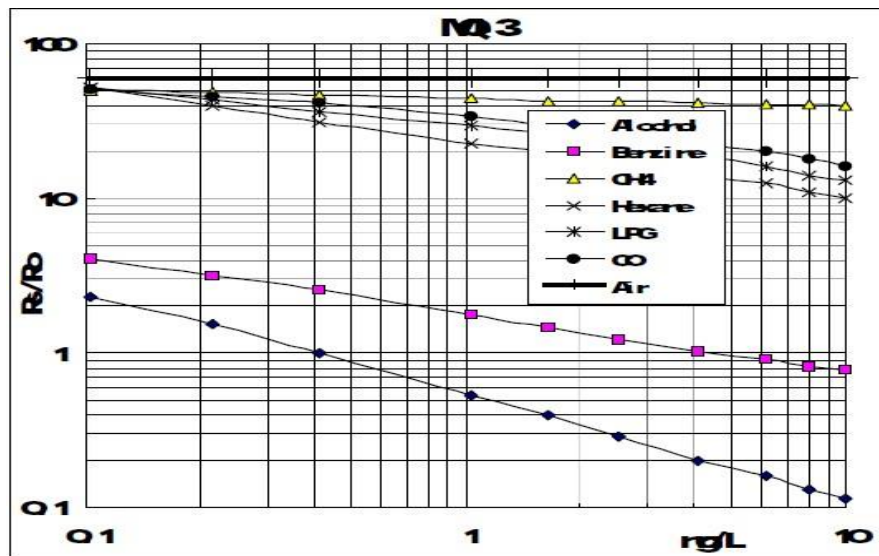


Figure 18: Les caractéristiques de sensibilité typique de MQ-3 pour plusieurs gaz.

### II.3.1.3 Le Capteur MQ-135 :

Le MQ135 est un capteur qui permet de mesurer la qualité de l'air. Il est sensible aux principaux polluants présents dans l'atmosphère de la maison. Comme le CO<sub>2</sub>, l'alcool, le Benzène, l'oxyde d'azote (NOX) et l'ammoniac (NH<sub>3</sub>), et le monoxyde de carbone. Ce capteur utilise le dioxyde d'étain (SnO<sub>2</sub>) dont la conductivité électrique varie en fonction de la présence de polluant(s). Comme tous les capteurs de la série MQ il faudra procéder à une calibration dans une atmosphère de référence pour mesurer la présence d'un polluant en Particulier. [12]



Figure 19: Capture QM-135.

#### II.3.1.3.1. Caractéristiques :

- Sensibilité : 10 - 300 ppm pour l'ammoniac, 10 - 1000 ppm pour le benzène, 10 - 300 ppm pour l'alcool
- Temps de réponse :  $\leq 10$  secondes (70% de réponse).

- Temps de récupération :  $\leq 30$  secondes (70% de réponse).
- Température ambiante de fonctionnement :  $-20$  à  $+55^{\circ}\text{C}$ .
- Humidité :  $\leq 95\%$  HR.
- Teneur environnementale en oxygène : 21%.
- Température de stockage :  $-20$  à  $+70^{\circ}\text{C}$ .
- Humidité de stockage :  $\leq 70\%$  RH .
- Courbe caractéristique de sensibilité :

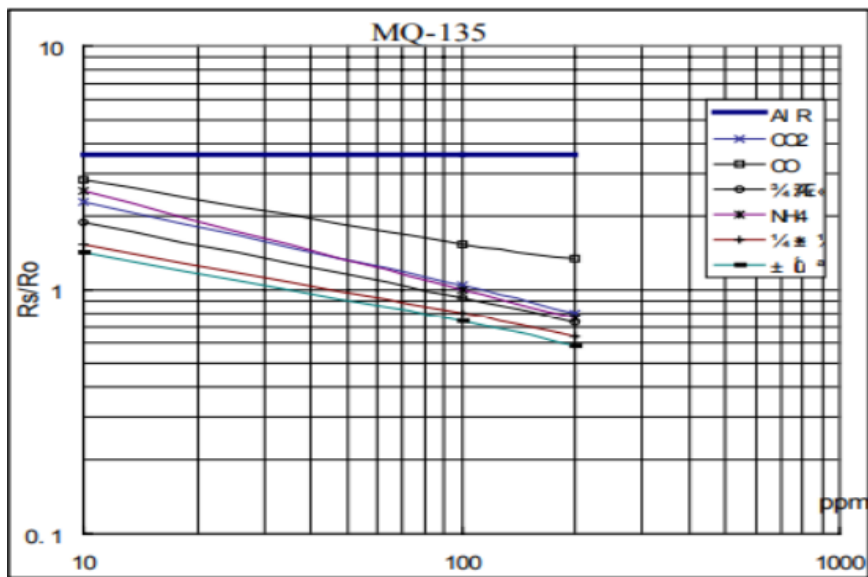


Figure 20: Les caractéristiques de sensibilité typique de MQ-135 pour plusieurs gaz.

### II.3.1.4 Le Capteur MQ4 :

Le capteur de gaz MQ4 est un capteur de gaz naturel comprimé (GNC) qui permet de détecter les concentrations de gaz naturel (composé principalement de méthane [CH<sub>4</sub>]) dans l'air. Il peut détecter des concentrations de gaz naturel de 200 à 10 000 ppm.

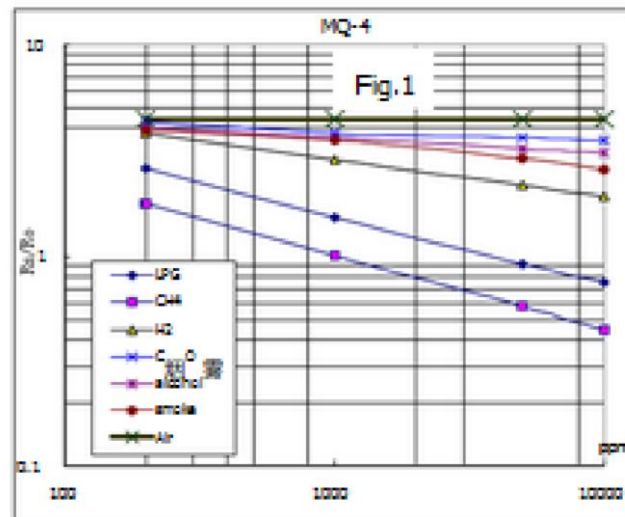


Figure 21: Capteur MQ4.

### II.3.1.4.1 Caractéristiques :

- Alimentation : 5 Vcc
- Consommation :  $\leq 180$  mA (au démarrage du capteur)
- Plage de mesure : 300 à 10 000 ppm
- Sortie analogique et digitale (double sortie de signal)
- Sensibilité élevée
- Temps de réponse rapide
- Bonne stabilité et longue durée de service.

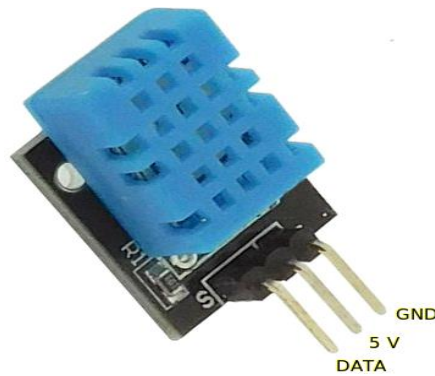
➤ Courbe caractéristique de sensibilité :



**Figure 22:** Les caractéristiques de sensibilité typique de MQ-4 pour plusieurs gaz.

### II.3.1.5 Capteur DHT11:

DHT11 est un capteur numérique de température et d'humidité, le capteur composite contient une sortie de signal numérique calibré de la température et de l'humidité, application d'une technologie de collecte de modules numériques dédiés et de la technologie de détection de température et d'humidité, Le capteur comprend un sens résistif de composants humides et un dispositif de mesure de température, et connecté avec un microcontrôleur 8 bits haute performance. [13]



**Figure 23:** Capture DHT11.

#### II.3.1.5.1 Caractéristiques principales du capteur DHT11 :

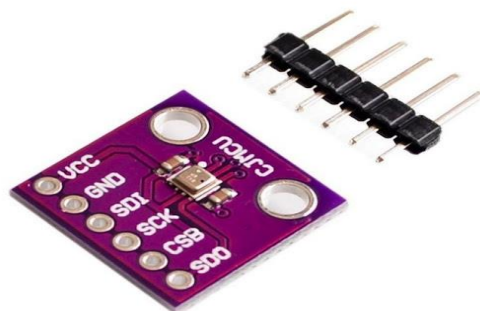
- Alimentation : 3 à 5 V.
- Consommation : 0,5 mA en nominal / 2,5 mA maximum.
- Plage de mesure de la température : 0 à 50 °C  $\pm$  2 °C.
- Plage de mesure de l'humidité : 20 à 90 %  $\pm$  5 %.
- Dimensions : 16 x 12 x 7 mm.
- Interface : 3 broches (5 V, GND et DATA).

Le capteur DHT11 est idéal pour des projets de domotique, de robotique et de surveillance d'ambiance.

#### II.3.1.6 Capture BMP280 :

Le BMP280 est une carte de dérivation dotée d'un capteur de température, d'humidité et de pression Bosch Sensortec MP280.

Le module dispose d'un cavalier d'adresses I2C sélectionnable (lien de soudure GS2), les résistances de traction I2C, l'en-tête de 7 broches 2.54mm, et deux trous de montage 3.5mm.



**Figure 24:** Capture BMP280.

**II.3.1.6.1 Caractéristiques:**

- Dimensions : 13mm x 10mm x 3mm.
- Tension de fonctionnement : 1,71V à 3,6V.
- Consommation de courant : 1.8  $\mu$ A à 1Hz humidité et température, 2.8  $\mu$ A à 1Hz pression et température, 3.6  $\mu$ A à 1Hz humidité, pression et température et 0.1  $\mu$ A en mode veille.
- Température de fonctionnement : -40 et +85°C.

**III.3.3 Microcontrôleur :**

L'ESP32 est une carte à base de microcontrôleur avec des modules Wifi et Bluetooth intégrés. Très simple d'utilisation il est léger et possède une capacité de mémoire et de calculs supérieurs à l'Arduino. Ce qui en fait une carte idéale pour l'apprentissage de la programmation, le développement d'objets connectés ou de serveur. La base, pour créer des objets connectés, est de les connecter à un réseau comme le réseau WiFi. Il intègre un émetteur-récepteur WiFi ce qui lui permet de se connecter à des réseaux existants ou bien de mettre en place son propre réseau. Grâce à cela, il est possible de créer un serveur qui héberge une interface Web permettant de piloter le microcontrôleur ESP32 à distance. L'ESP32 contenant un microprocesseur double cœur fonctionnant en 32 bits. Le microcontrôleur ESP32 possède 48 GPIO dont 25 sont disponibles sur les broches. Sur ces 25 broches:

- 15 peuvent être utilisées pour des entrées analogiques
- 25 peuvent être utilisées comme sorties PWM
- 9 comme capteurs capacitifs.
- Certaines sont réservées pour les protocoles de communication série (SPI, I2C, Serial).



**Figure 25:** Carte ESP32.

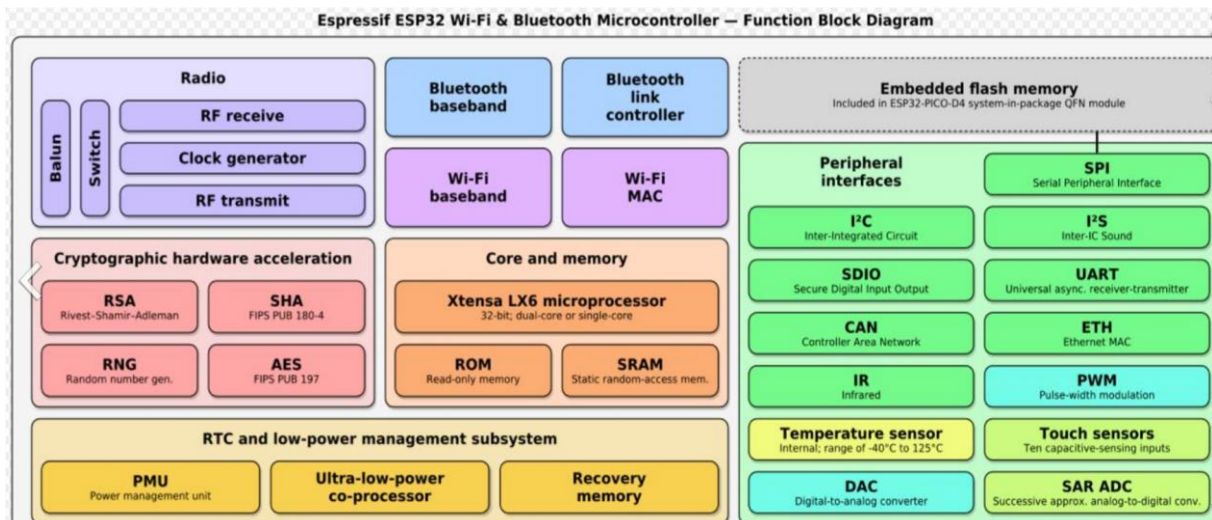


Figure 26: Schéma fonctionnel du l'ESP32.

### II.3.3.1 Caractéristiques : [9]

#### II.3.3.1.1 Le processeur :

La carte ESP32, est dotée d'un processeur intégré. Toutefois, en raison des tâches multiples liées à la mise à jour de la pile Wifi, la plupart des applications utilisent un microcontrôleur séparé pour le traitement des données, l'interfaçage des capteurs et la sortie numérique, ce qui n'est pas le cas avec l'ESP32, ce dernier est équipé de microprocesseurs LX6 Xtensa Dual-Core 32 bits, pouvant fonctionner jusqu'à 600 DMIPS. Les deux cœurs qui sont nommés Protocole CPU (PRO\_CPU) et Application CPU (APP\_CPU) peuvent être contrôlés individuellement, Cela signifie que le processeur PRO\_CPU gère le Wifi, le Bluetooth et d'autres périphériques internes tels que SPI, I2C...etc. L'APP\_CPU n'est pas renseigné pour le code de l'application, cette différenciation est effectuée dans le cadre de développement internet expressifs, ce dernier est le cadre de développement logiciel officiel de la puce.

#### II.3.3.1.2 Mémoire interne :

Les processeurs ont une mémoire interne étroitement liée pour les utilisations suivantes : ROM de 448 K Bytes pour le démarrage et les fonctions principales

- . SRAM intégrée de 520 Ko pour les données et les instructions
- . SRAM de 8 Ko, est accessible au coprocesseur pendant le mode de sommeil profond.
- . SRAM de 8 K octets, utilisée pour le stockage de données.

#### II.3.3.1.3 Flash externe et SRAM :

La plupart des modules tels que ESP32 Wroom utilisent une mémoire externe de type : Flash-W25Q32 (4M Bytes) pour stocker le code de l'application. La puce prend en charge 64 Mo de mémoire flash QSPI externe et de mémoire SRAM. ESP32 accède à la mémoire flash QSPI

externe et à la mémoire SRAM via des caches à grande vitesse. 16 Mo de mémoire flash externe sont mappés en mémoire sur l'espace de code de la CPU, prenant en charge les accès 8, 16 et 32 bits. L'exécution de code est prise en charge. Une mémoire SRAM externe pouvant contenir jusqu'à 8 Mo est mappée en mémoire sur l'espace de données de la CPU, prenant en charge les accès 8, 16 et 32 bits. La lecture de données est prise en charge sur la mémoire flash et la mémoire SRAM. L'écriture de données est prise en charge sur la mémoire SRAM. Il est également intéressant de noter que les deux processeurs sont mappés Symétriquement à cet espace adresse. En gros, cela signifie qu'un registre, par exemple, peut être accédé depuis le même emplacement d'adresse depuis les deux CPU.

#### **II.3.3.1.4 Le WI-FI :**

L'ESP32 implémente TCP / IP, le protocole MAC WLAN 802.11 complet et la spécification Wifi Direct. Cela signifie que l'ESP 32 peut parler à la plupart des routeurs Wifi lorsqu'il est utilisé en mode station (client). En outre, il est capable de créer un point d'accès avec l'ensemble 802.11. ESP32 prend également en charge le Wifi Direct qui est plus facile à configurer et la vitesse de transfert de données est bien meilleure que celle de Bluetooth. Cela pourrait éventuellement être utilisé pour configurer des projets ESP32 à partir d'un téléphone / d'une tablette prenant en charge le Wifi directement.

#### **II.3.3.1.5 Bluetooth classique et Bluetooth basse énergie (BLE) :**

ESP32 supporte non seulement la dernière version de BLE Bluetooth 4.2, mais également Bluetooth classique. Cela signifie qu'il peut parler aux anciens et aux nouveaux téléphones, tables Bluetooth. Cela pourrait être l'une des meilleures fonctionnalités, en particulier si vous concevez un appareil devant fonctionner avec les nouveaux téléphones ou tablettes du marché.

#### **II.3.3.1.6 Les périphériques :**

L'Esp32 DevKit V1 Doit disposer de 30 broches auxquelles on peut attribuer différentes fonctions en programmant les registres appropriés

- Broche EN (Enable) du régulateur 3.3V.
- 15 ADC (convertisseur analogique-numérique).
- Interfaces SPI. GPIO 34, 35 ,36 et 39 sont utilisé comme des entrées seulement.
- 4 interfaces UART.
- 2 interfaces I2C. 2 DCA (convertisseurs numérique-analogique).
- Télécommande infrarouge (TX / RX, jusqu'à 8 canaux).
- 16 canaux de sortie PWM.
- 9 GPIO à détection capacitive.

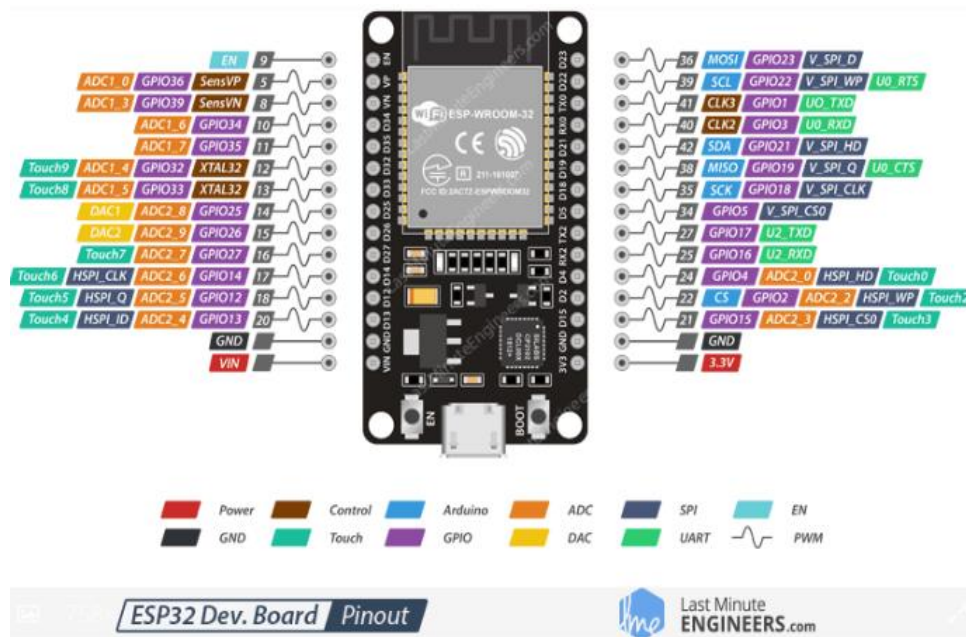


Figure 27: Les broches de l'ESP32.

## II.4 Partie logicielle :

### II.4.1 Langage de programmation Arduino :

Le langage Arduino est implémenté en C/C++ et basé sur le câblage. Lorsque nous écrivons un Arduino croquis, nous faisons implicitement l'utilisation de la bibliothèque de câblage, qui est incluse avec l'IDE. Ceci nous permet de faire des programmes exécutables en utilisant seulement deux fonctions : `setup ()` et `loop ()`. Comme mentionné la langue de câblage est inspirée par le traitement, et la structure de la langue Arduino héritée du langage de traitement, où les fonctions équivalentes sont appelées « `setup ()` » et « `loop()` ».

L'IDE permet d'écrire, de modifier un programme et de le convertir en une série d'instructions compréhensibles pour la carte.

#### II.4.1.1 Fonctions de langage :

Comme nous avons dit, le langage Arduino utilise deux fonctions :

« `Setup ()` » Et « `loop ()` » qui fonctionnent comme suit :

- **Fonction Setup ()** : Cette fonction est exécutée qu'une seule fois, juste après nous téléchargeons une nouvelle esquisse à la carte, et ensuite chaque fois que nous allumerons notre Arduino. Nous utilisons cette fonction pour initialiser les variables, modes de broches, etc.

- **Fonction Loop ()** : Est exécutée en continu dans une boucle sans fin alors que la carte Arduino est alimentée. Cette fonction est le noyau de la plupart des programmes. La figure représente un exemple qui montre la structure de chacune de ces fonctions :

#### II.4.1.2 Structure d'un programme :

Un programme Arduino comporte trois parties :

- La partie déclaration des variables.
- La partie initialisation et configuration des entrées/sorties : la fonction « setup () ».
- La partie principale qui s'exécute en boucle : la fonction « loop () ».

Dans chaque partie d'un programme en utilisant différentes instructions issues de la syntaxe du langage Arduino.

Lorsque le code est écrit dans l'interface de programmation, certains mots apparaissent en différentes couleurs qui clarifient le statut des différents éléments.

- En orange, apparaissent les mots-clés reconnus par le langage Arduino comme des fonctions existantes.
  - En bleu, apparaissent les mots-clés reconnus par le langage Arduino comme des constantes.
  - En gris, apparaissent les commentaires qui ne seront pas exécutés dans le programme. Il est utile de bien commenter son code pour s'y retrouver facilement ou pour le transmettre à d'autres personnes. L'on peut déclarer un commentaire de deux manières différentes :
  - Dans une ligne de code ,tout ce qui se trouve après « // » sera un commentaire. L'on peut encadrer des commentaires sur plusieurs lignes entre « /\* » et « \*/ ».
- Le système Arduino, nous donne la possibilité d'allier les performances de la programmation à celles de l'électronique. Le gros avantage de l'électronique programmée c'est qu'elle simplifie grandement les schémas électroniques et par conséquent, le cout de la réalisation, mais aussi la charge de travail à la conception d'une carte électronique.

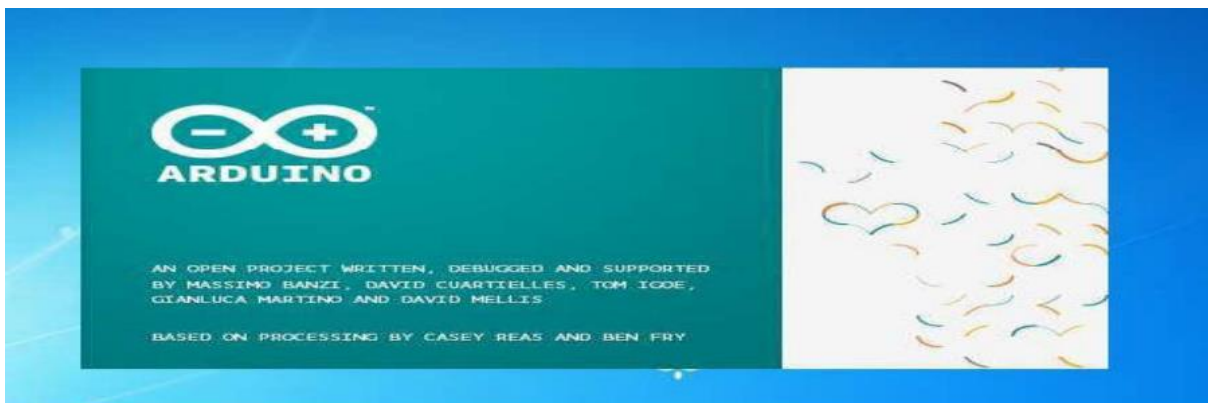
#### II.4.1.3 Applications d'Arduino :

Le système Arduino nous permet de réaliser un grand nombre d'applications dans tous les domaines, l'étendue de l'utilisation de ce système est gigantesque. Pour quelques exemples, nous pouvons :

- Contrôler les appareils domestiques.
- Fabriquer un robot.
- Faire un jeu de lumières.
- Communiquer avec l'ordinateur.
- Télécommander un appareil mobile (modélisme).
- Construire un appareil de mesure de tension/courant.
- Fabriquer une imprimante 3D.
- Etc.

#### II.4.1.4 Interface du logiciel :

Lançons le logiciel en double-cliquant sur l'icône avec le symbole "infinie" en vert. C'est l'exécutable du logiciel. Après un léger temps de réflexion, une image s'affiche est représentée sur la **figure (28)** comme suit :



**Figure 28:** Interface de logiciel Arduino.

Après quelques secondes, le logiciel s'ouvre. Une fenêtre se présente à nous l'interface de programmation nommée « Sketch » qui est représentée sur la figure suivante :

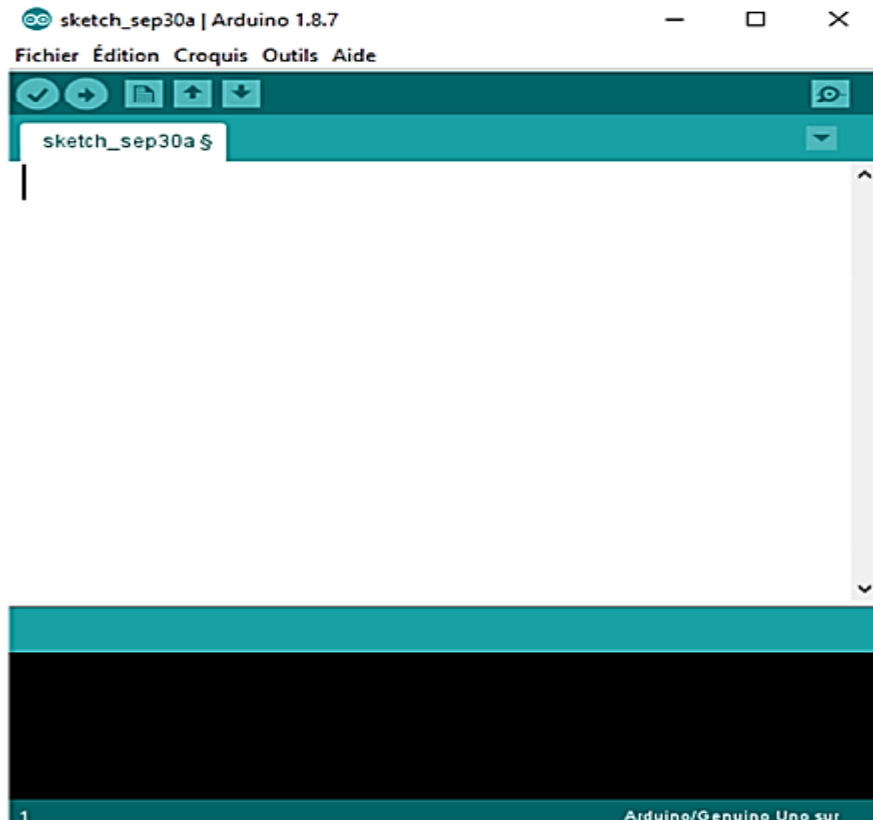


Figure 29: Interface de programmation Arduino "Sketch".

Ce qui saute aux yeux en premier, c'est la clarté de présentation du logiciel. Nous pouvons voir comment se compose cette interface sur la **figure (30)** :

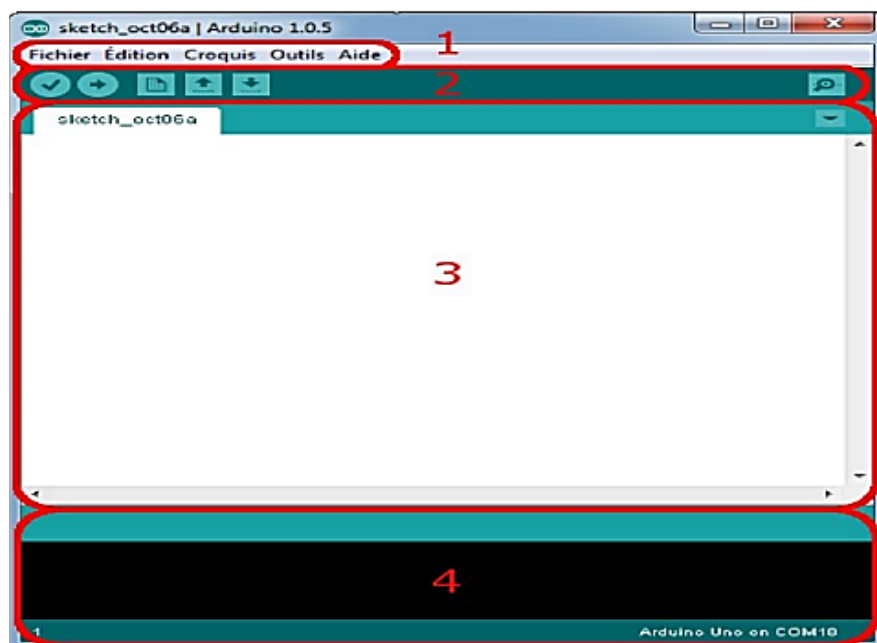
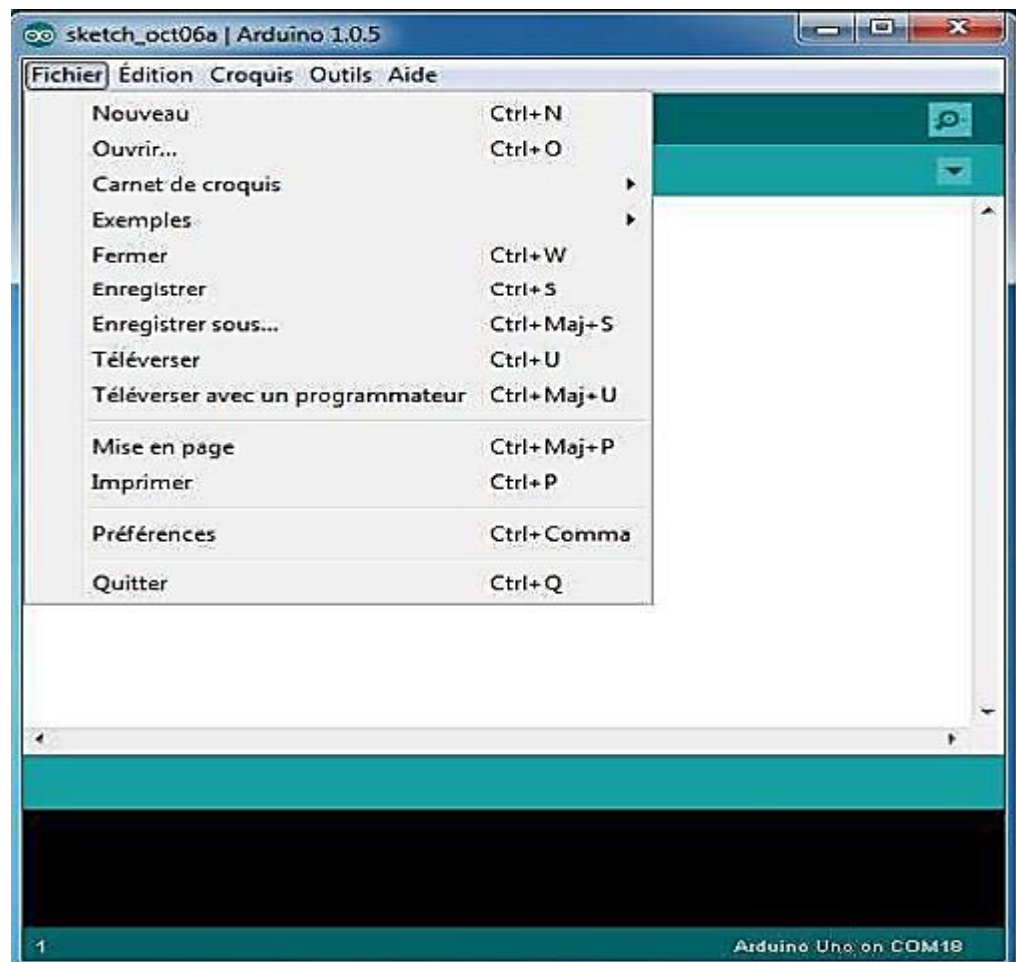


Figure 30: Différentes zones de l'interface du logiciel.

Tel que :

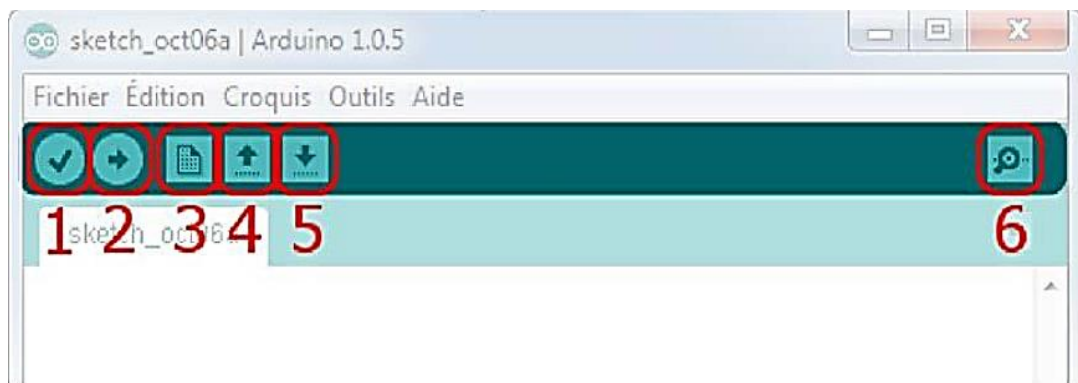
- **Le cadre numéro 1** : ce sont les options de configuration du logiciel.
- **Le cadre numéro 2** : il contient les boutons qui vont nous servir lorsque l'on va programmer nos cartes.
- **Le cadre numéro 3** : ce bloc va contenir le programme que nous allons créer.
- **Le cadre numéro 4** : celui-ci est important, car il va nous aider à corriger les fautes dans notre programme. C'est le **débogueur**.
- La barre des menus est entourée en rouge et numérotée par le chiffre 1.

Le menu Fichier : C'est principalement ce menu que l'on va utiliser le plus. Il dispose d'un certain nombre d'opérations qui vont nous être très utiles. Il a été traduit en français progressivement, nous allons donc voir sur la **figure (31)** les quelques options qui sortent de l'ordinaire :



**Figure 31:** Différentes options de menu "Fichier".

1. **Carnet de croquis** : Ce menu regroupe les fichiers que nous avons pu faire Jusqu'à maintenant (et s'ils sont enregistrés dans le dossier par défaut du logiciel)
  2. **Téléverser** : Permet d'envoyer le programme sur la carte ESP 32.
  3. **Préférences** : Nous pourrions régler ici quelques paramètres du logiciel.
- Les boutons encadrés en rouge et numérotés par des chiffres, sont présentés sur la **figure(32)**



**Figure 32:** Différents boutons de logiciel.

Tels que :

- **Bouton 1** : Ce bouton permet de vérifier le programme, il actionne un module qui cherche les erreurs dans notre programme.
- **Bouton 2** : Charge (téléverser) le programme dans la carte ESP32.
- **Bouton 3** : Créer un nouveau fichier.
- **Bouton 4** : Ouvrir un fichier.
- **Bouton 5** : Enregistrer le fichier.
- **Bouton 6** : Ouvrir le moniteur série (ce moniteur nous permet de saisir des commandes).

#### II.4.2 ThingSpeak, plate-forme gratuite pour l'Internet des objets (IoT) :

ThingSpeak est à la fois une API et une application en open source conçue pour faciliter l'utilisation de l'Internet des objets. Cette plateforme permet de stocker et de récupérer les données provenant d'objets connectés via le protocole HTTP, que ce soit sur Internet ou un réseau local. Avec ThingSpeak, les utilisateurs ont la possibilité de créer diverses applications,

telles que des systèmes d'enregistrement de données provenant de capteurs, des applications de suivi de localisation, ainsi qu'un réseau social dédié aux objets connectés, permettant des mises à jour en temps réel sur leur état.



**Figure 33:** L'interface d'accueil du ThingSpeak.

#### II.4.2.1 Définition API :

Une interface de programmation d'application, couramment désignée par le sigle API (Application Programming Interface), se présente sous la forme d'une architecture standardisée, comprenant des classes, des méthodes ou des fonctions. Elle joue le rôle d'une frontière à travers laquelle un logiciel offre des services à d'autres programmes ou applications.

#### II.4.2.2 Fonctions du ThingSpeak :

Le ThingSpeak offre plusieurs fonctions parmi lesquelles on trouve :

- API ouverte
- Collecte de données en temps réel
- Données de géolocalisation
- Traitement des données
- Visualisation de données
- Messages d'état des circuits
- Plugins

Un des avantages du ThingSpeak est qu'il peut être intégré aux plates-formes Arduino, Raspberry Pi...etc.

### II.4.2.3 Configuration ThingSpeak à l'aide de la plate-forme Arduino :

#### Étape 1 : Création de notre compte.

Pour accéder aux données sur ThingSpeak en vue de les analyser et de les traiter, il est nécessaire de créer un compte utilisateur. La figure (34) illustre l'interface de la page d'inscription sur le site de ThingSpeak :

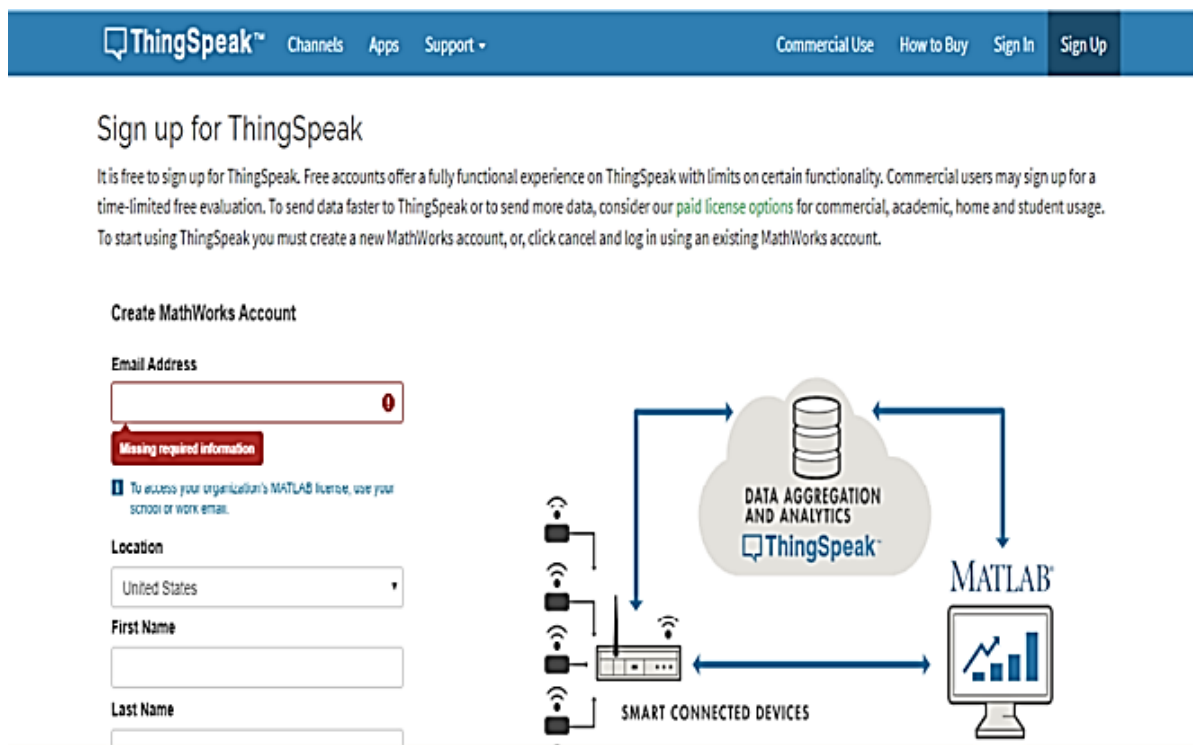
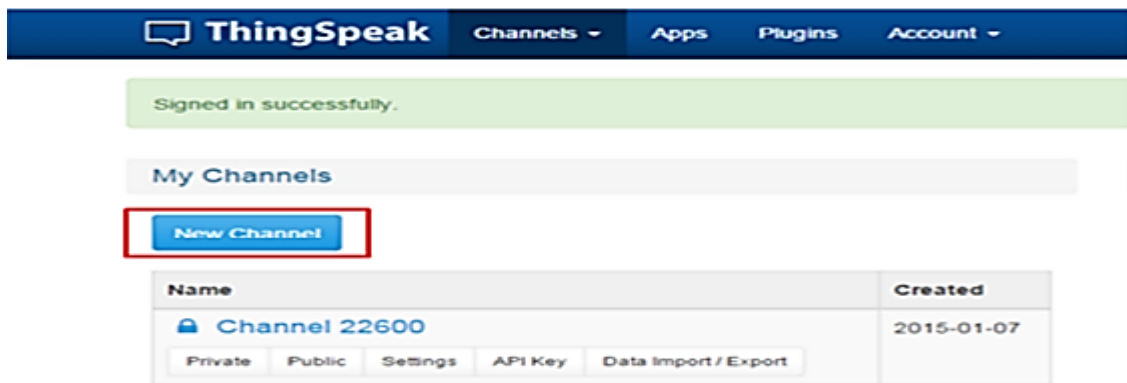


Figure 34: L'interface pour s'inscrire dans ThingSpeak.

#### Étape 2 : Création d'un canal de communication.

On clique sur le bouton « New Channel » pour créer le canal de communication. La figure (35) présente la procédure de la création du canal.



**Figure 35:** Création du canal de communication.

Pour créer un canal, vous pouvez saisir les détails nécessaires. Par exemple, vous pouvez utiliser le nom de votre projet comme nom du canal. Si nécessaire, vous pouvez laisser certains champs facultatifs vides, tels que la description, les métadonnées et les étiquettes. Les champs à remplir reflètent les données que vous allez télécharger. Par exemple, si vous mesurez la température de l'environnement, vous pouvez nommer le champ 1 "Température". Une fois les détails saisis, il suffit de cliquer sur "Enregistrer le canal". Votre canal est alors prêt à recevoir les données que vous souhaitez télécharger.

La **figure (36)** illustre l'interface dédiée pour la spécification de détails du canal de communication.

Percentage Complete 15%

Channel ID 23207

Name Channel 23207

Description

Metadata

Tags

Latitude

Longitude

Elevation

Make Public?

URL

Video ID   YouTube  Vimeo

Field 1   remove field

Field 2   add field

Field 3   add field

Field 4   add field

Field 5   add field

Field 6   add field

Field 7   add field

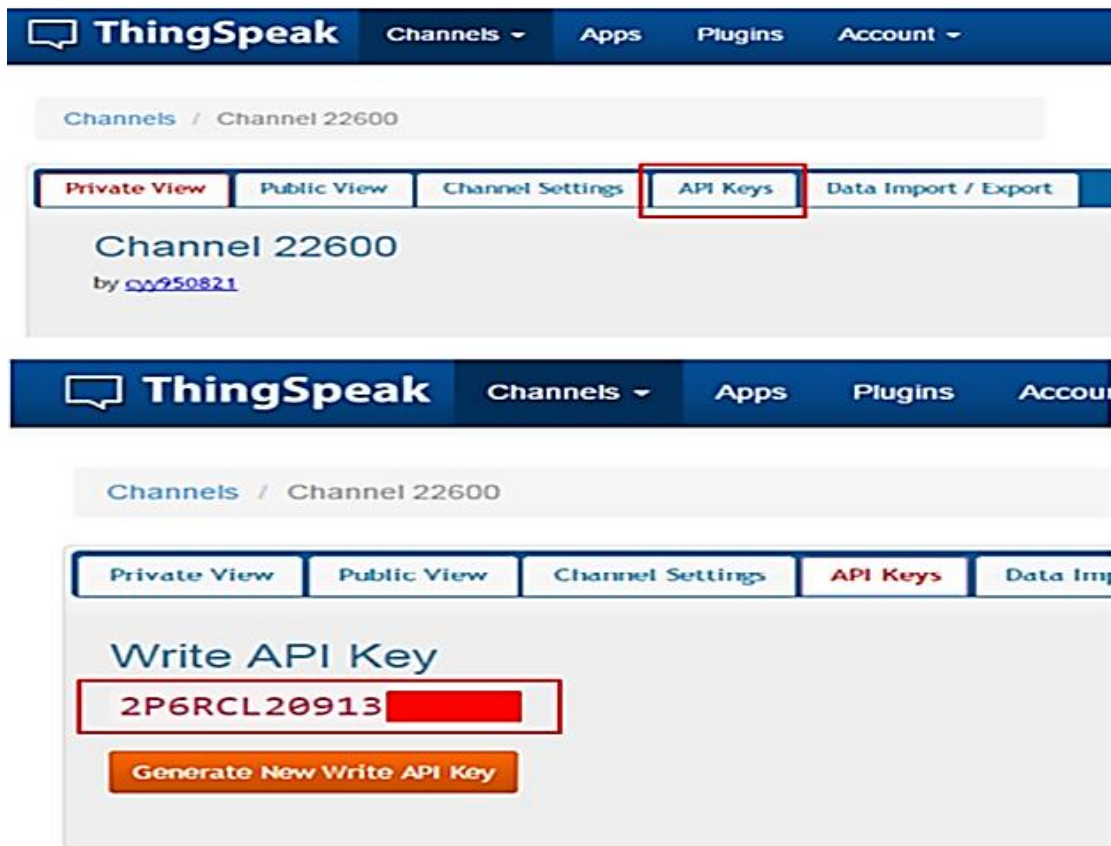
Field 8   add field

Figure 36 : Détails du canal de communication.

**Étape 3 : Recherchez la clé API correspondant à notre canal.**

Chaque canal dispose d’une clé API unique, destinée à garantir le téléchargement des données aux bons emplacements.

La clé API est mémorisée par « Écrire clé API ». Nous l'utiliserons pour programmer notre plate-forme Arduino. La **figure (37)** illustre la génération de la clé API.



**Figure 37:** Génération de la clé API.

## II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les différents outils tels que : la carte ESP32, les différents capteurs, le module wifi, ainsi logiciel utilisé. Dans les chapitres suivants nous allons associer ces différentes parties présentées pour concevoir notre propre système.

# **Chapitre III**

## **Réalisation du système de mesure multi-gaz**

### III.1 Introduction :

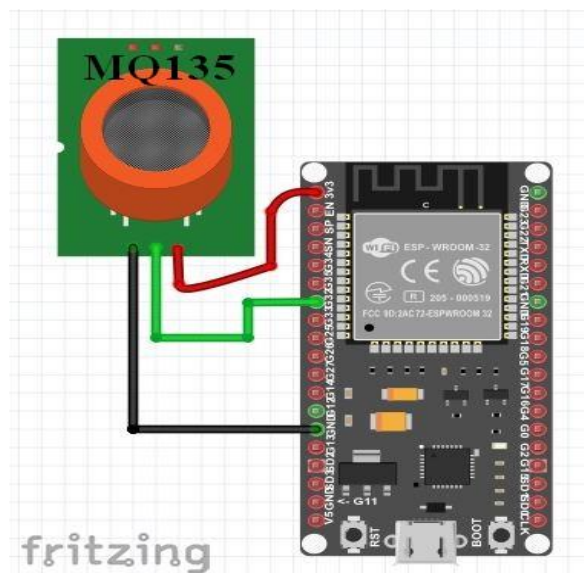
Dans ce chapitre, nous mettrons à profit les outils présentés précédemment pour élaborer notre propre système multi-gaz. Les paragraphes suivants décriront les différentes étapes de réalisation de ce système.

### III.2 La réalisation du projet :

La réalisation matérielle est faite en premier lieu, chaque partie est réalisée et tester séparément selon leur fonctionnement.

#### III.2.1 Capteur de gaz MQ-135 :

**Représentation :** ce schéma montre le montage du circuit capteur MQ-135 à la carte ESP32.



**Figure 38:** Schéma de branchement de capteur MQ-135 à l'ESP32.

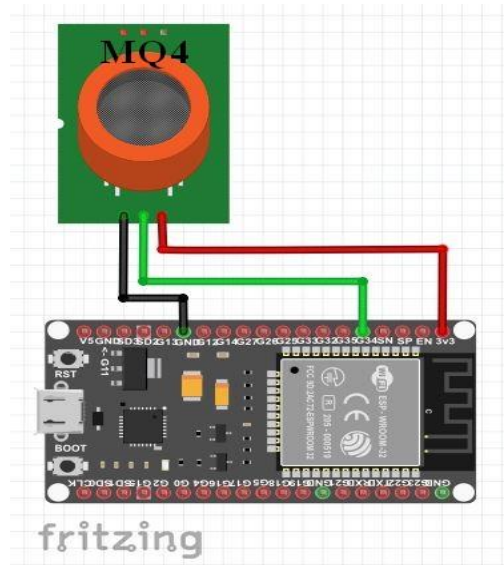
Le choix des pins pour la connexion de capteur MQ-135 à la carte ESP32 est défini dans le tableau suivant :

Capteur MQ-135	ESP32
VCC	3,3
GND	GND
D0	Non connecté
A0	A4 (G32 de la carte)

**Tableau 03:** La connexion de capteur MQ-135 à ESP32.

## III .2 .2 Capteur de gaz MQ-4 :

**Représentation :** ce schéma montre le montage du circuit capteur MQ-4 à la carte ESP32.



**Figure 39:** Schéma de branchement de capteur MQ-4 à l'ESP32.

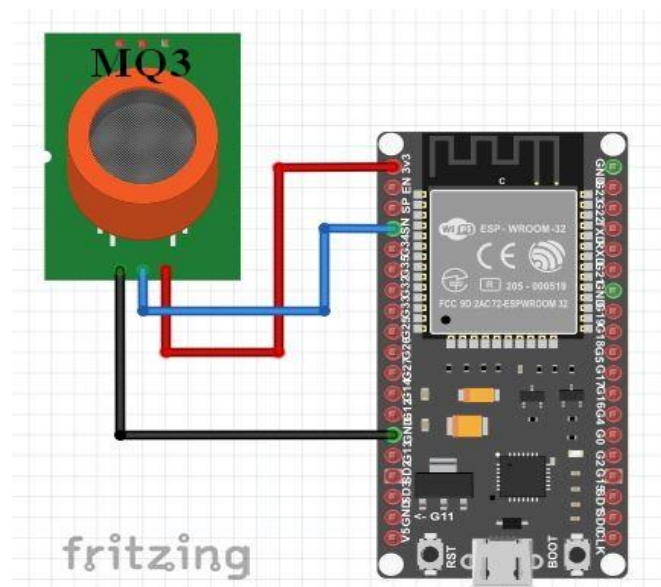
Le choix des pins pour la connexion de capteur MQ-4 à la carte ESP32 est défini dans le tableau suivant :

Capteur MQ-4	ESP32
VCC	3,3V
GND	GND
D0	Non connecté
A0	A6 (G34 de la carte)

**Tableau 04:** La connexion de capteur MQ-4 à ESP32.

## III .2 .3 Capteur de gaz MQ-3:

**Représentation :** ce schéma montre le montage du circuit capteur MQ-3 à la carte ESP32.



**Figure 40:** Schéma de branchement de capteur MQ-3 à l'ESP32.

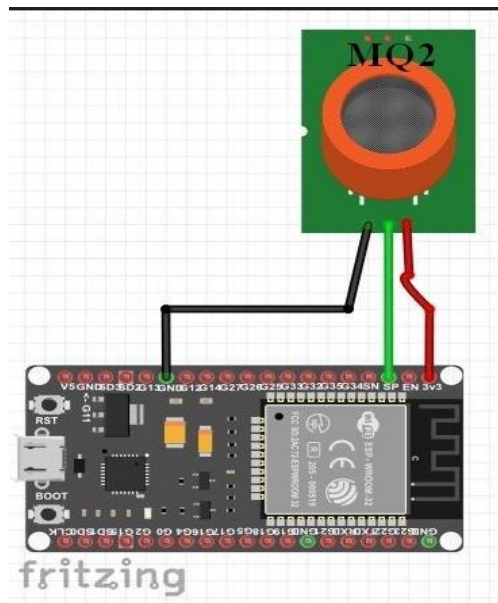
Le choix des pins pour la connexion de capteur MQ-3 à la carte ESP32 est défini dans le tableau suivant :

Capteur MQ-3	l'ESP32
VCC	3,3V
GND	GND
D0	Non connecté
A0	A3 (NS de la carte)

**Tableau 05:** La connexion de capteur MQ-3 à ESP32.

### III .2 .4 Capteur de gaz MQ-2:

**Représentation :** ce schéma montre le montage du circuit capteur MQ-2 à la carte ESP32.



**Figure 41** : Schéma de branchement de capteur MQ-2 à l'ESP32.

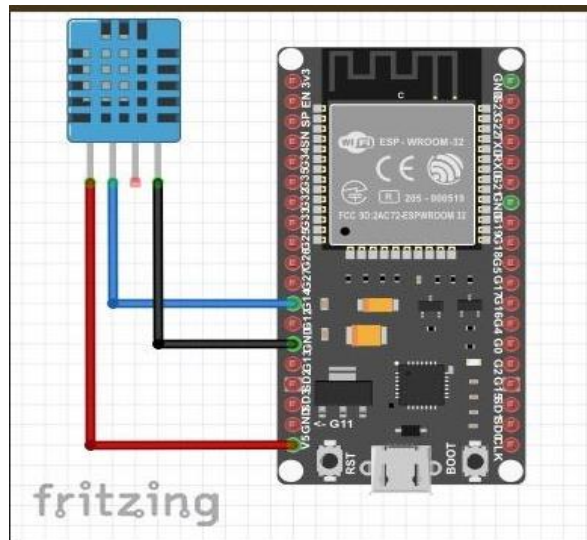
Le choix des pins pour la connexion de capteur MQ-2 à la carte ESP32 est défini dans le tableau suivant :

Capteur MQ-2	l'ESP32
VCC	3,3V
GND	GND
D0	Non connecté
A0	A0 (NS de la carte)

**Tableau 06:** La connexion de capteur MQ-2 à ESP32.

### III .2 .5 Capteur DHT11:

**Représentation** : ce schéma montre le montage du circuit capteur DHT11 à la carte ESP32.



**Figure 42:** Schéma de branchement de capteur DHT11 à l’ESP32.

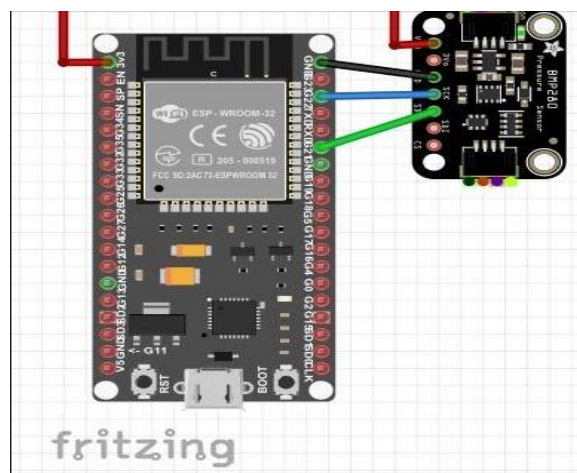
Le choix des pins pour la connexion de capteur DHT11 à la carte ESP32 est défini dans le tableau suivant :

Capteur DHT11	L’ESP32
+VCC	5V
OUT PIN	PIN14
-VCC	GND

**Tableau 07:** La connexion de capteur DHT11 à ESP32.

**III .2 .5 Capteur BMP280:**

**Représentation :** ce schéma montre le montage du circuit capteur BMP280 à la carte ESP32.



**Figure 43:** Schéma de branchement de capteur BMP280 à l’ESP32.



L'afficheur				L'ESP32			
Rs				15			
En				2			
d4	d5	d6	d7	0	4	16	17

Tableau 09 : La connexion de capteur L'afficheur à ESP32.

Après avoir réalisée séparément tout les circuit du système, nous avons assemblé ces partie dans un seul circuit qui présent notre projet globale, comme il est figuré dans la figure ci-dessus :

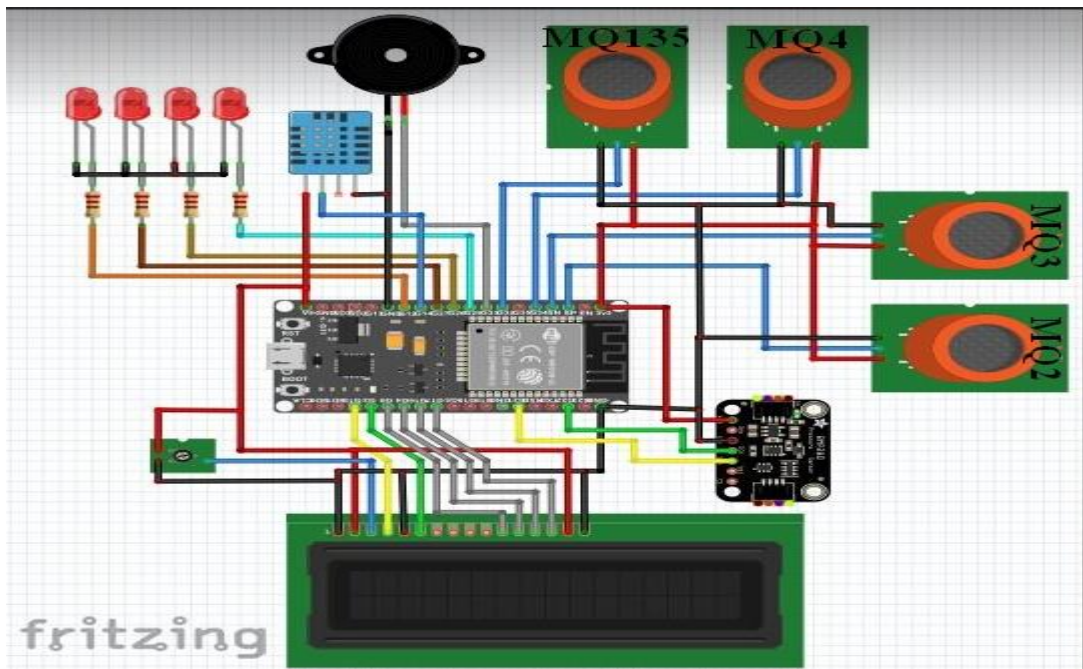
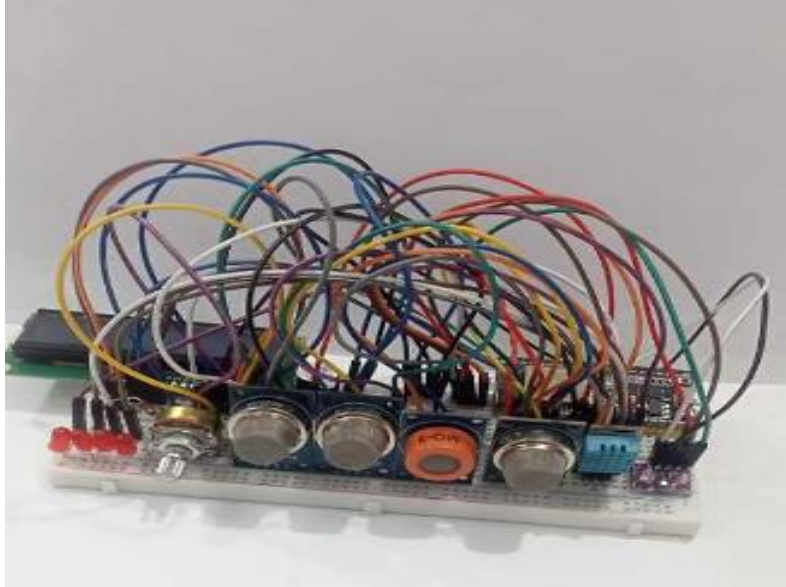


Figure 45: Circuit de branchement de tout le system sur logiciel fritzing.

D'après la figure (45), les capteurs de gaz (MQ-2, MQ-3, MQ-4, MQ-135) sont connectés respectivement aux broches analogiques (A0, A3, A6, A4) de l'unité de traitement à microcontrôleur ESP32. Le capteur DHT11 est branché sur la broche (14), et le capteur BMP280 est connecté à la broche (I2C). L'afficheur est relié aux broches (15, 2, 0, 4, 16,17), tandis que les LED rouges sont connectées aux broches (25, 26, 27 et 2). Le buzzer est branché sur la broche (33).



**Figure 46:** Schéma de réalisation du détecteur d'un système multi-gaz.

### III. 3 Conception de la partie commande :

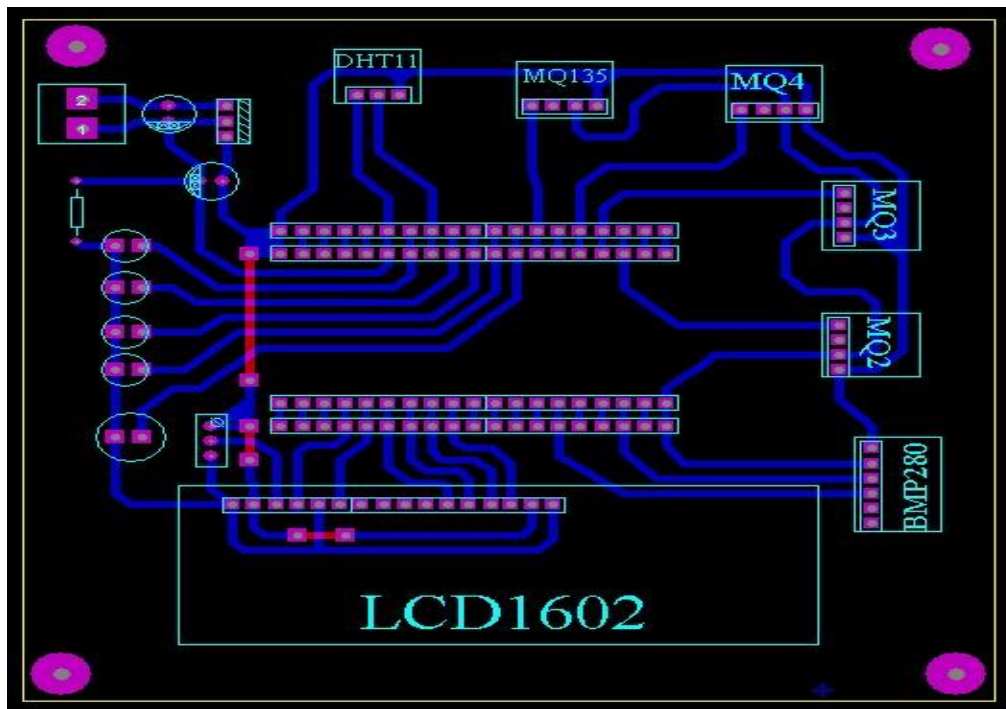
#### III.3.1 Construire notre carte de commande :

- Carte ESP32.
- 4 leds.
- Buzzer.
- Afficheur.
- Une Résistance 1kohm.
- Potentiomètre.

#### III.3.2 Etapes de fabricant la carte :

Réalisation de circuit électrique :

En utilisant le logiciel **ISIS ARES**, ce logiciel est conçu pour dessiner manuellement des circuits imprimés, pour les imprimer. Figure(47)



**Figure 47:** Circuit électrique de notre carte de commande.

- Pour qu'on puisse réaliser notre carte on a suivi ces étapes :
- Découper la plaque Epoxy/cuivre aux dimensions du futur circuit imprimé 11\*10cm.
  - Enlevez la feuille de plastique protégeant la face, de la plaque cuivre sensible aux rayons ultra-violets de la lumière ambiante pour plaquer le typon sur le cuivre, et Mettre tout dans l'insoleuse uv, en vérifiant bien son sens.
  - Trempez la plaque pré sensibilisée dans le bain révélateur en suivant bien les consignes de sécurité. Si le révélateur est récent ou très actif, l'opération risque d'être très courte ! Observez bien l'action du produit qui désagrège la couche photosensible brûlée par les ultra-violets, ne laissant que le tracé des futures pistes sur la couche de cuivre.

Après avoir percé les emplacements appropriés et implanté les différents composants conformément au schéma de câblage indiqué dans la figure (44), nous concluons notre réalisation par l'étape finale de soudure.

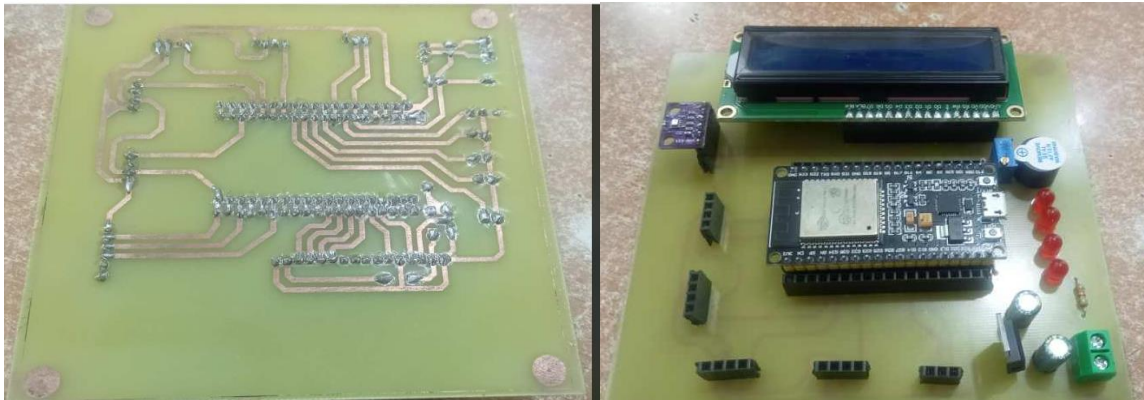


Figure48: Image réel de notre carte électronique.

### III.4 Réalisation du système :

Le système comprend un bloc principal composé d'une carte à microcontrôleur de type ESP32, qui est connectée à un canal de communication Wi-Fi. Ce canal de communication sera utilisé pour se connecter à une interface cloud telle que ThingSpeak. Cette interface cloud permettra d'afficher les données collectées par les capteurs.

Le système est composé de quatre capteurs de gaz :

- Capteur de gaz MQ-2 : Pour détecter le butane.
- Capteur de gaz MQ-4 : Pour détecter le CH<sub>4</sub>(Méthane).
- Capteur de gaz MQ-135 : Pour détecter le CO<sub>2</sub>.
- Capteur de gaz MQ-3 : Pour détecter l'alcool.

### III.5 Fonctionnalités du système :

Le fonctionnement de système est décomposé en trois blocs :

- **Bloc d'acquisition** : Les valeurs analogiques renvoyées par les capteurs (MQ-2, MQ-3, MQ-4, MQ-135) via leur sortie analogique (AOUT) sont lues par la carte à microcontrôleur sur les broches analogiques dans l'ordre suivant :( A0, A3, A6, A4), et les deux autre capteurs (DHT11, BMP280) reliée respectivement aux branche (A14, I2C).
- **Bloc de contrôle commande** : Les données reçues par le microcontrôleur seront traitées pour associer à chaque capteur ses valeurs respectives. Ensuite, ces données seront envoyées au module Wi-Fi pour être transmises à l'interface cloud.
- **Bloc de collecte et d'affichage** : Une fois la connexion établie, le module Wi-Fi se connecte au serveur pour permettre l'affichage des données collectées dans l'interface cloud (ThingSpeak).

### III.5.1 Programmation de la carte ESP32 :

Après l'interconnexion des différents composants, l'étape suivante consiste en la programmation de la carte ESP32. Les étapes de programmation du microcontrôleur sont :

- La création du projet.
- L'écriture du programme ensuite son enregistrement.
- La vérification de la syntaxe et correction d'éventuelles erreurs.
- Le téléversement vers le microcontrôleur.

### III.5.2 Composition du programme Arduino :

Pour programmer la carte ESP32, l'environnement IDE est utilisé. Notre. Ce programme comporte différentes routines, chacune est destinée à remplir une tâche spécifique :

1. Le "Programme Principal" comprend les configurations initiales du microcontrôleur pour les différentes entrées analogiques et leur utilisation. De plus, il déclare les différentes constantes telles que le nombre d'itérations, la temporisation entre chaque itération lors des phases de calibrage et de mesure, la résistance de charge utilisée, ainsi que les points de mesure qui définissent la résistance relative par rapport à la concentration du gaz mesuré en échelle logarithmique. Cette échelle logarithmique dépend à la fois du type de gaz et du capteur utilisé.
2. La fonction « calibration » : cette routine est destinée à donner une valeur moyenne des mesures issues du capteur après conversion analogique numérique, et ceci pour trouver la valeur de  $R_0$  dans de l'air ambiant. La formule mathématique de cette fonction est :

$$f(x) = \frac{1}{N \times R_c} \sum_{n=1}^N R_o \quad [1]$$

$N$  : le nombre d'itérations pris pour la phase de calibration.

$R_c$  : La résistance de charge dans l'air ambiant.

$R_o$  : La résistance de sortie du capteur.

3. La fonction « mesure » : cette routine est destinée à donner une valeur moyenne des mesures issues du capteur après conversion analogique numérique, et ceci pour la mesure ( $R_s$ ). La formule mathématique de cette fonction est :

$$g(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N R_s \quad [2]$$

**N** : le nombre d'itérations pris pour la phase de calibration.

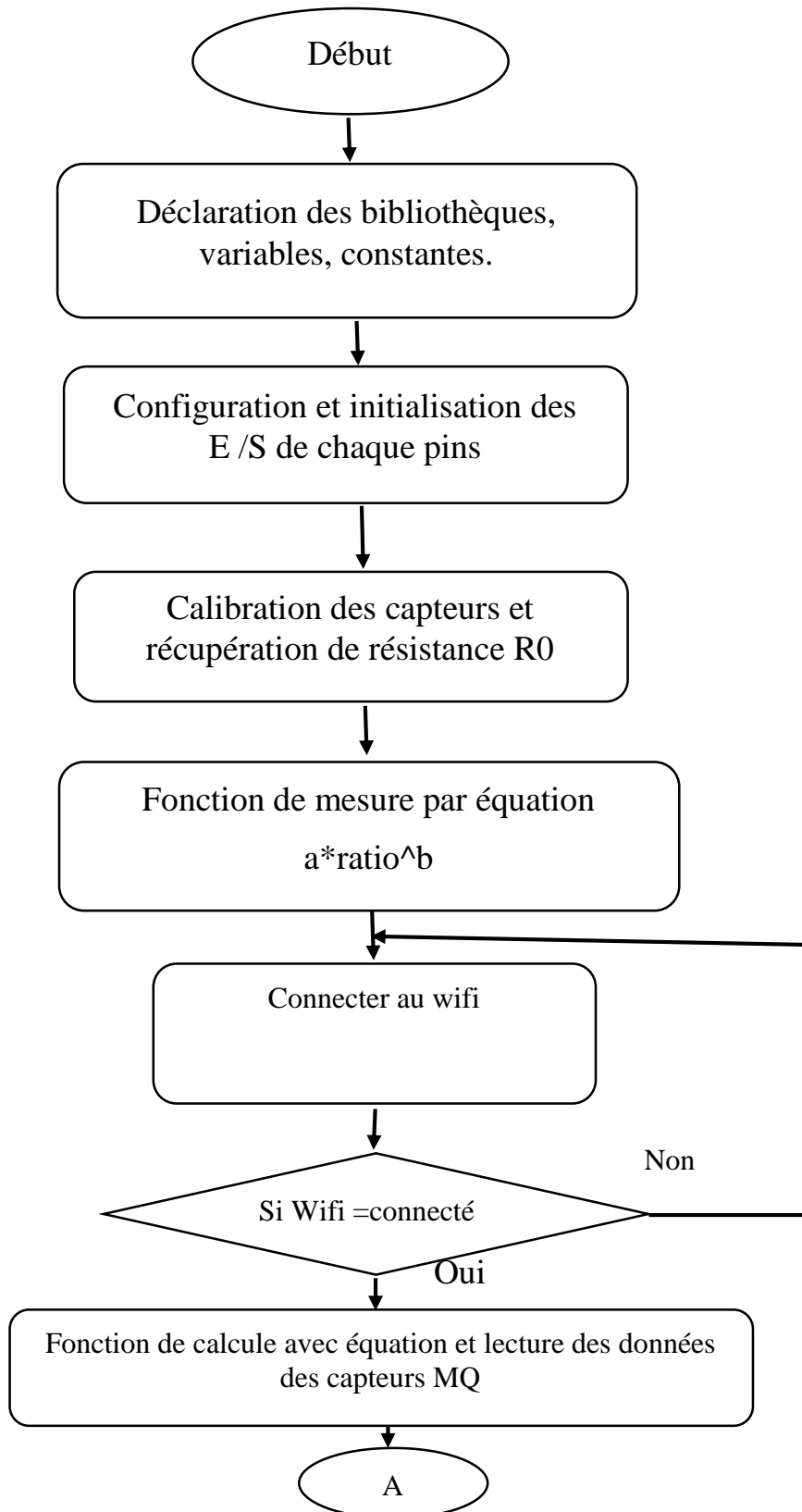
**R<sub>c</sub>** : La résistance de charge dans l'air ambiant.

**R<sub>o</sub>** : La résistance de sortie du capteur.

4. La fonction "Calcul de concentration" est chargée de calculer la concentration du gaz mesuré en se basant sur la courbe fournie dans le datasheet, qui représente la réponse du capteur au gaz.
5. La fonction "Signalisation" est responsable d'activer l'alarme sonore (buzzer), d'allumer la LED rouge, et d'envoyer les données à ThingSpeak.

## III.6 Organigramme du fonctionnement général :

La figure figure(49) représente les différentes étapes pour crée notre système.



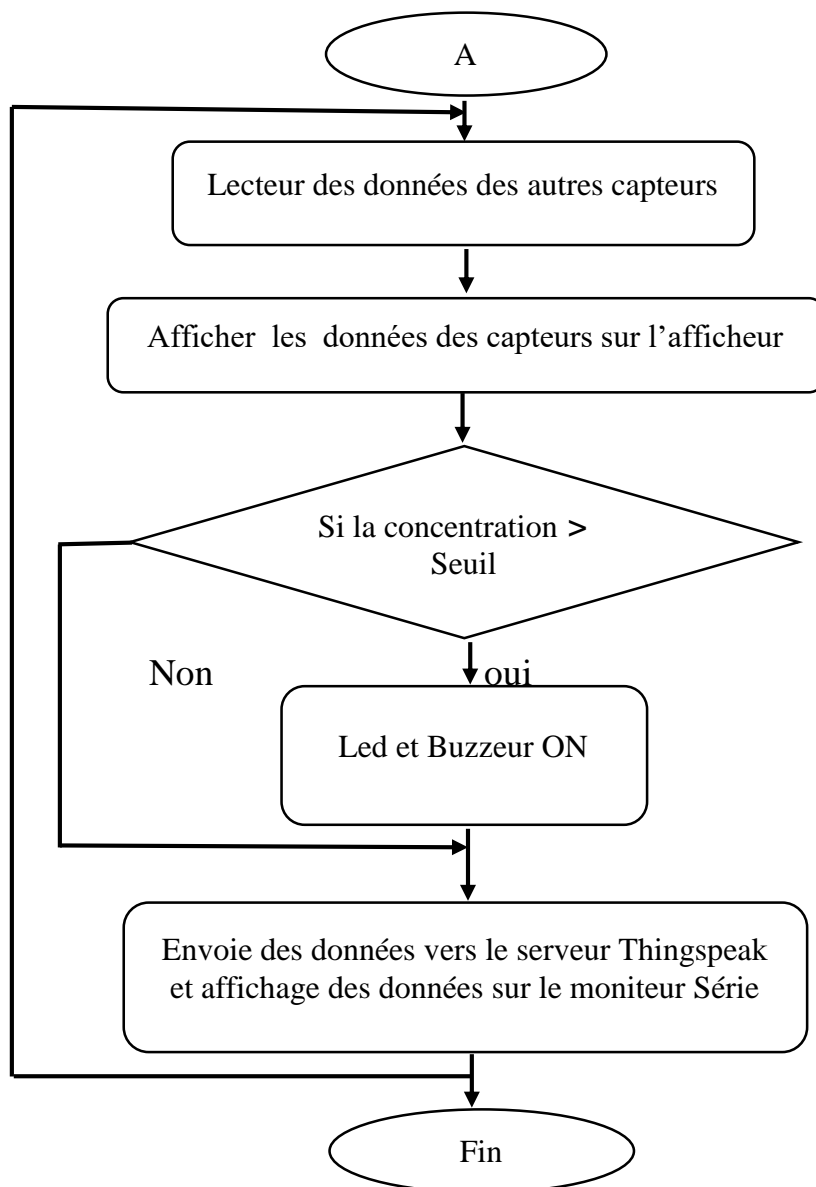
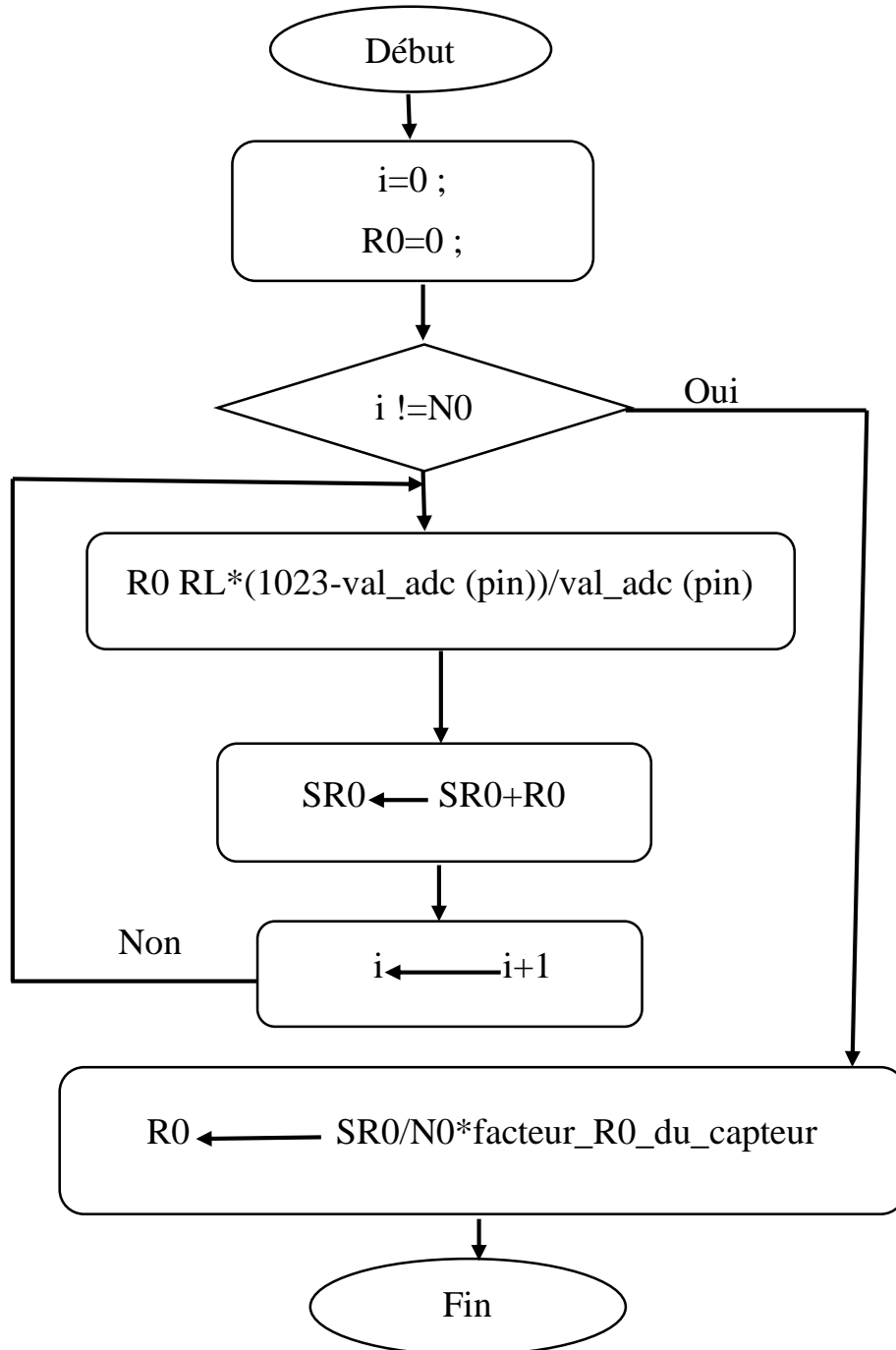


Figure 49 : Organigramme du fonctionnement général du programme arduino

### III.7 Organigramme de la fonction « calibration » :

La figure(50) illustre l'organigramme de la fonction « calibration ».



**Figure 50:** Organigramme de la fonction « calibration ».

SR0 : la somme de R0.

i: itération en cours d'exécution.

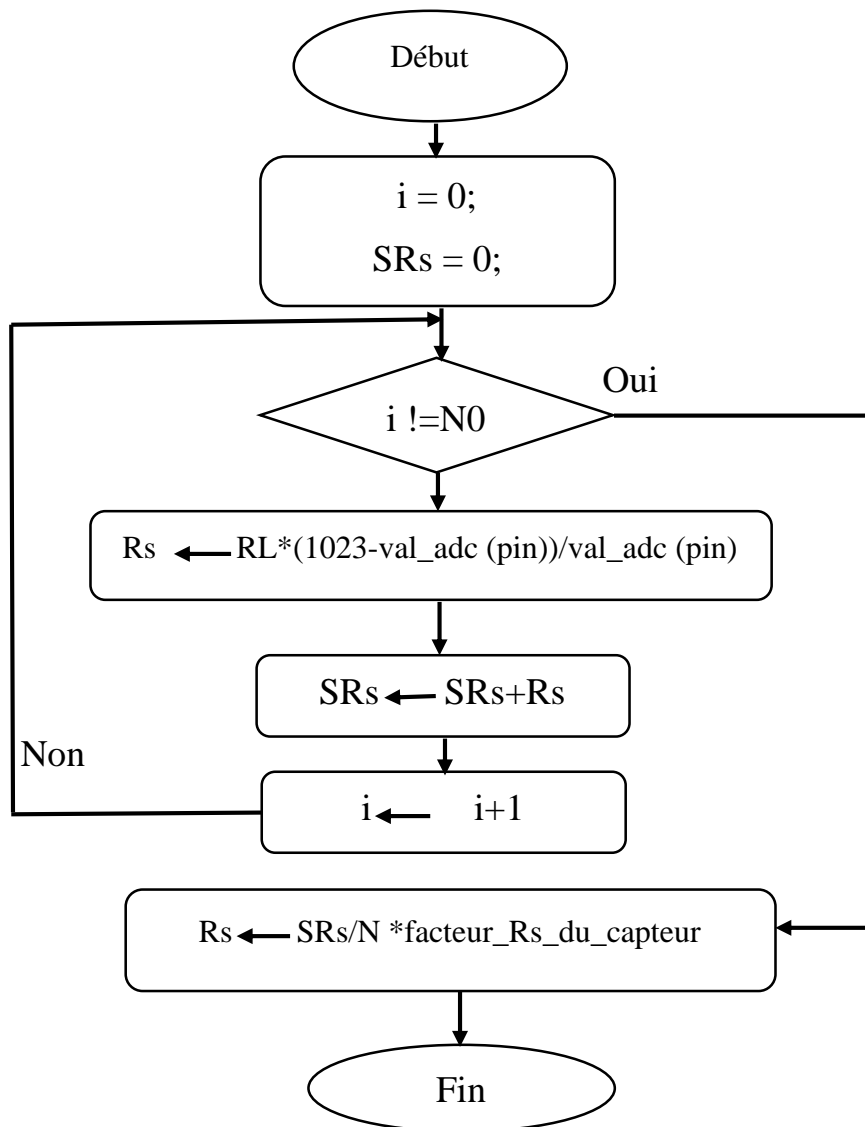
RL : résistance de charge.

R0 : résistance du capteur en air ambiant.

N0 : nombre d'itération maximal.

### III.8 Organigramme de la fonction mesure dans le programme Arduino :

La Figure (51) illustre l'organigramme de la fonction mesure dans le programme arduino.



**Figure 51 :** Organigramme de la fonction « mesure ».

SRs : la somme de Rs.

i : itération en cours d'exécution.

RL : résistance de charge.

Rs : résistance du capteur.

N : nombre d'itération maximal.

III.9 Résultats des essais :

III.9.1 Premier test :

Le premier essai implique l'injection de Smok. Les résultats de cette première expérience sont illustrés dans la figure (52).(Les résultats en PPM)

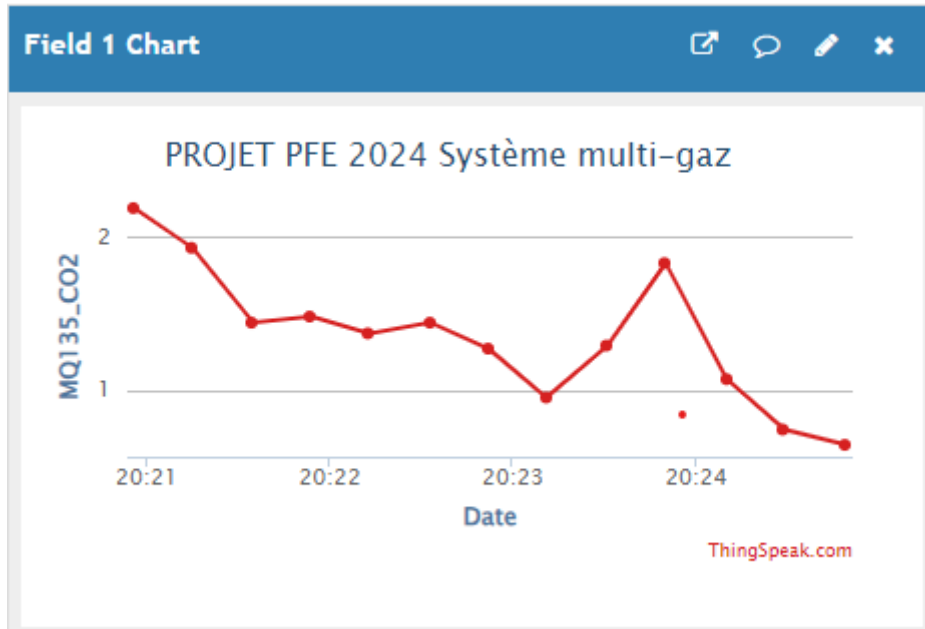


Figure 52 : a) courbe MQ-135.

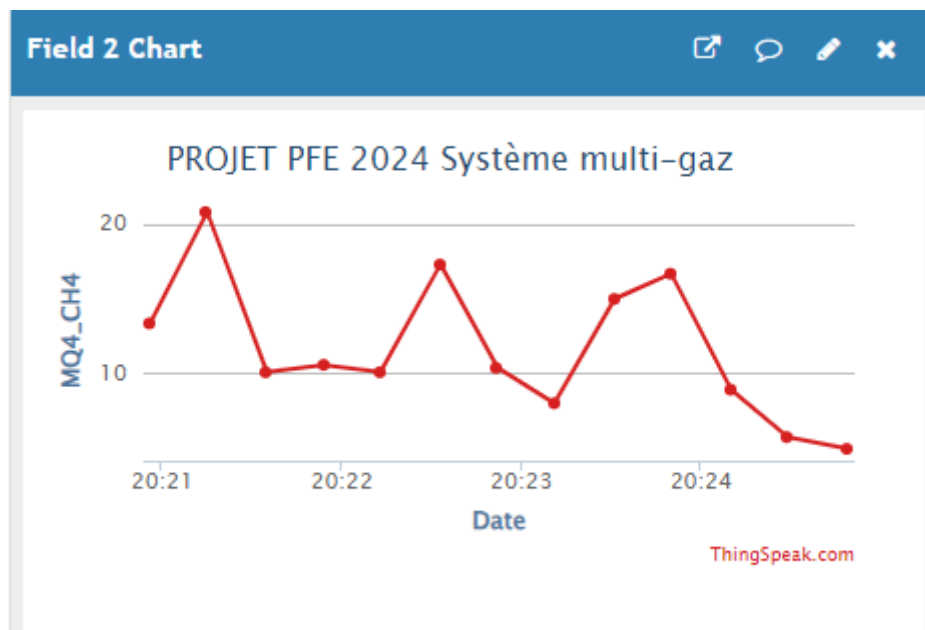


Figure 52 : b) courbe MQ-4.

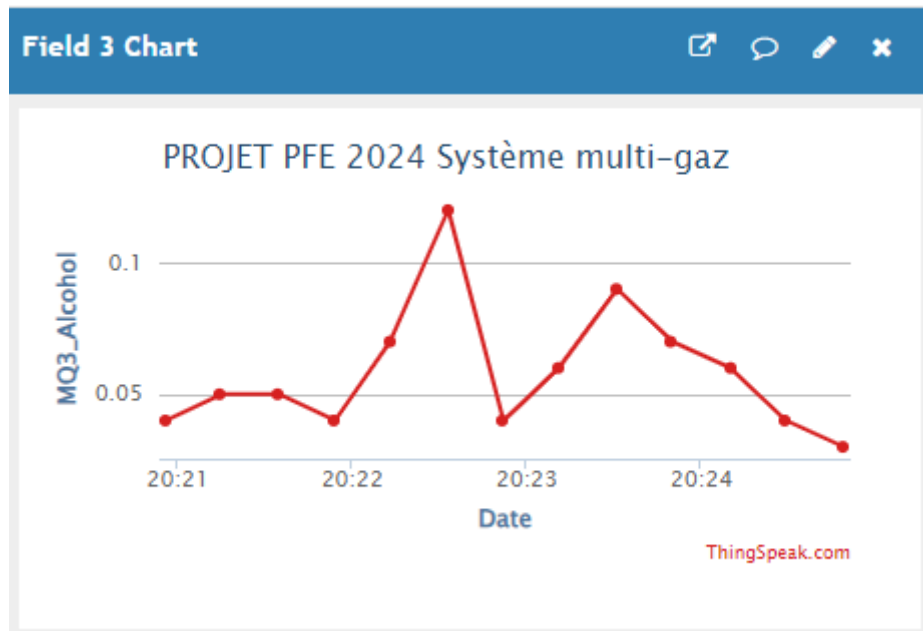


Figure 52 : c) courbe MQ-3.

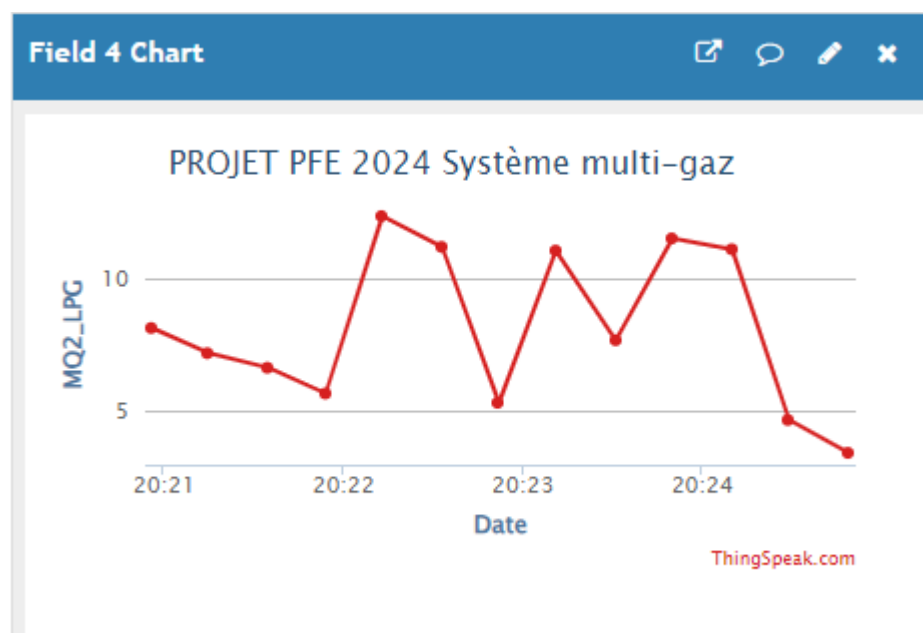


Figure 52 : d) courbe MQ-2.

D'après ces graphes on remarque que ces capteurs répondent presque de la même façon, car dans la fumée (smoke) on peut trouver plusieurs gaz.

III.9.2 Deuxième test :

Le deuxième essai implique l'injection de Propane. Les résultats de cette première expérience sont illustrés dans la figure (53). (Les résultats en PPM)

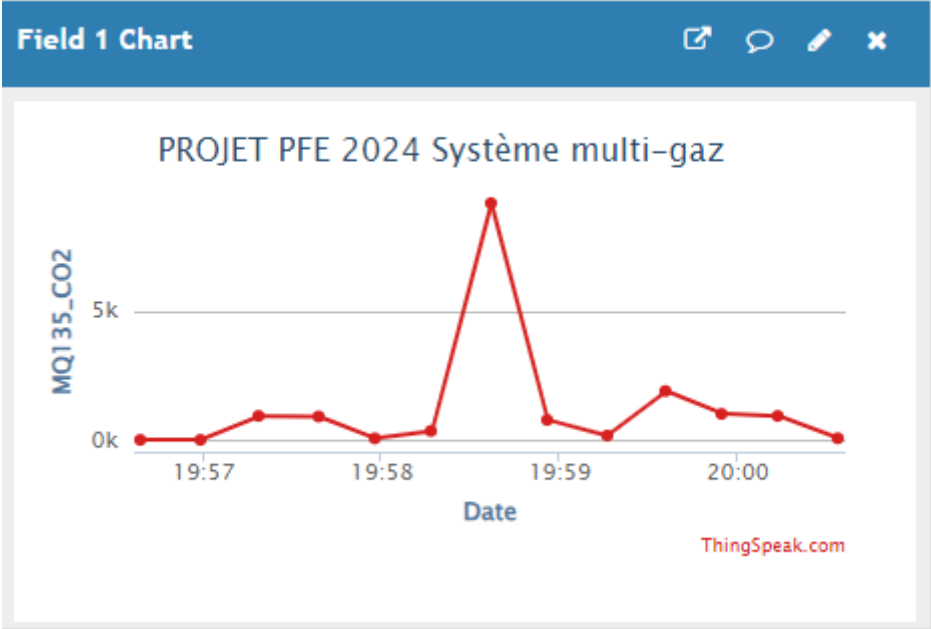


Figure 53 : a) courbe MQ-135.

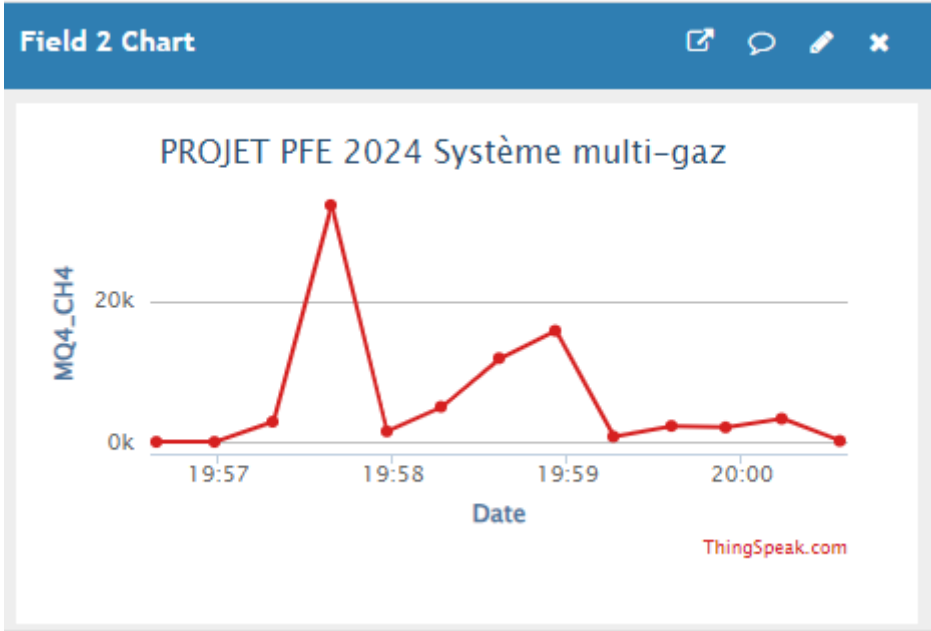


Figure 53: b) courbe MQ-4.

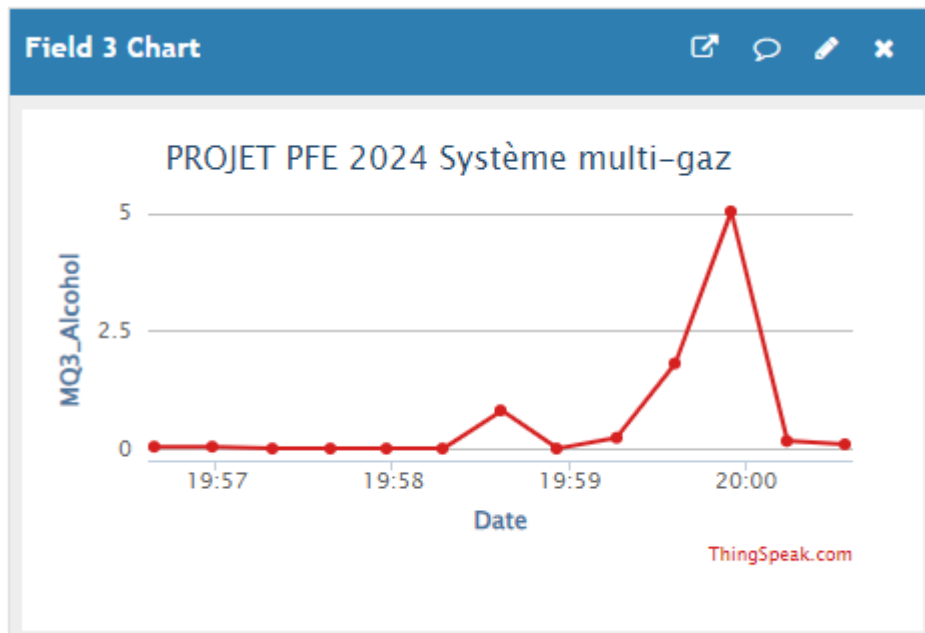


Figure 53: c) courbe MQ-3.

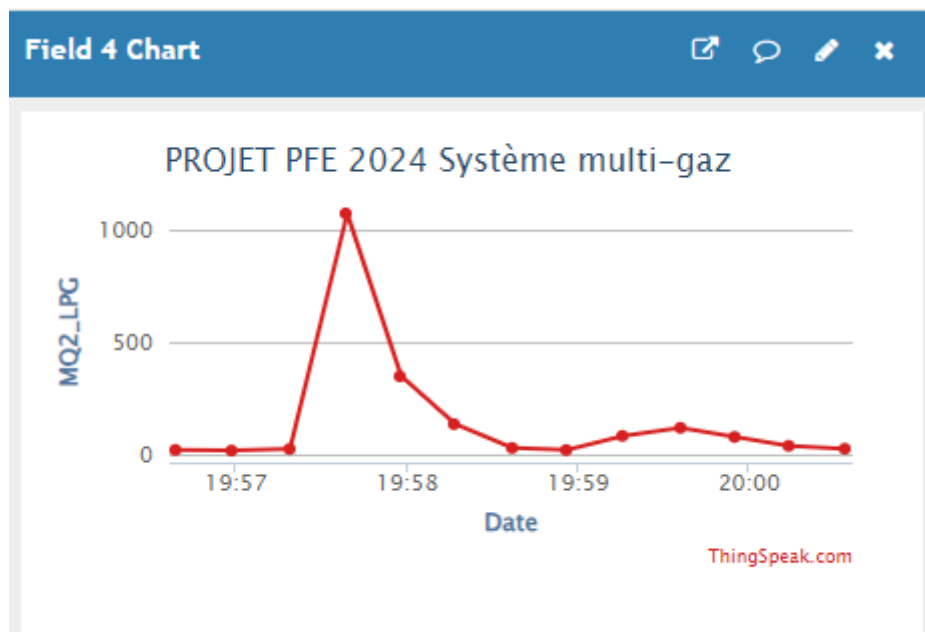


Figure 53: d) courbe MQ-2.

D'après ces graphes on constate que le capteur MQ2 répond rapidement à la présence de ce gaz (propane).

**Note :** La température et l'humidité jouent un rôle crucial dans la sensibilité des capteurs de gaz. Les variations de température peuvent influencer la réactivité des capteurs, modifiant ainsi leur capacité à détecter avec précision les gaz ciblés.

### **III.10.Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons examiné en détail les étapes variées impliquées dans la conception et la mise en œuvre du système de détection et de calcul de concentration de gaz.

Le système se compose de capteurs de gaz chargés de collecter des données, d'une carte ESP32 pour le traitement de ces données, ainsi que de dispositifs d'actionnement destinés à signaler toute irrégularité détectée.

Dernièrement, nous avons effectué des tests sur notre système en injectant du fumée et du propane pour évaluer sa performance.

# **Conclusion générale**

La station de mesure multi-gaz avec compensation des grandeurs de fluence offre une réponse stratégique aux défis de la détection des gaz en améliorant la précision et la fiabilité malgré la sensibilité des capteurs aux variations environnementales, ouvrant ainsi la voie à des applications plus robustes et à des avancées continues dans divers secteurs industriels et scientifiques.

Le but principal de ce projet est de concevoir un système polyvalent de détection de gaz, capable de fournir des mesures précises de différentes concentrations de gaz. Ce système se compose d'une série de capteurs chargés de recueillir les données, qui seront ensuite traitées par une carte à microcontrôleur. De plus, une fonctionnalité WiFi est intégrée pour permettre la transmission à distance des données en temps réel via l'Internet des objets.

Une fois le système conçu, des tests ont été réalisés. Les concentrations de gaz, exprimées en parties par million (ppm) par rapport au rapport  $R_s / R_0$ , sont affichées sur le moniteur série du logiciel IDE Arduino. De plus, les données sont envoyées à ThingSpeak pour générer des graphiques.

Ce projet pourrait être bénéfique pour les chimistes les biologistes et les agronomes qui se spécialisent dans les systèmes embarqués et la détection d'alarme.

Comme perspective de ce travail, des améliorations futures peuvent être apportées à ce projet, afin de rendre ce système de mesure sélective avec une compensation des grandeurs d'influence en utilisant l'intelligence artificielle.

### Bibliographie

- [1] " Gas chromatography" – news · newspapers · books · scholar · JSTOR (November 2020)
- [2]<https://fr.airliquide.com/solutions/calibration-et-analyse/chromatographie/quelle-est-la-principale-technique-danalyse-des-gaz>
- [3] KAHLADI Samia «Conception d'un Nez électronique », thèse doctorat, Université Batna2. 2018.
- [4]K. An NGO, Etude d'un système multi capteur pour la détection sélective des gaz, Thèse de Doctorat, UNIVERSITE PAUL CEZANNE AIX-MARSEILLE III, 2006.
- [5] Baameur Lotfi ,CHENINE, Selma et BENRABIA, Wassila « Identification des fonctions de surface d'un charbon actif TE80 en vue de préparation d'un capteur électrochimique » Mémoire de master , Université KASDI-MERBAH Ouargla.
- [6] BAHA Hakim « Conception d'un capteur de gaz. Batna » Mémoire de master, Université Hadj Lakhdar Batna, 2011/2012.
- [7] G.Asch. « Collaborateurs, capteurs en instrumentation industrielle ». Paris : Dunod, 1999.
- [8] Gue, A.M.Microcapteurs chimiques réalisés en technologie intégrée les capteurs chimiques. S.I. Edition spéciale du club CMC2, 1996.
- [9] Djouher. Daoui et Lynda. Chena «Conception et réalisation d'une canne intelligente», Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou. 2019.
- [10] CHOHRA Ibrahim, Etude et caractérisation un capteur de gaz à la température ambiante, mémoire Magistère, faculté de Génie Electrique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2017
- [11] ETIKA NURUSH, thèse doctorat, Université as islam negeri maulana malik ibrahim malanag .2022.
- [12] Khaled Ziane «Implémentation d'un système de détection d'alcool au volant basé sur une instrumentation virtuelle», Thèse doctorat , Université du Québec à Rimouski, 300, allée des Ursulines, Rimouski, QC, Canada, G5L 3A1. 2019.
- [13] KAMBOUCHE Sofiane et ATTOU Ismail : «Conception et réalisation d'un système d'agriculture intelligent. » Mémoire de master, Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent.
- [14] F. Rouessac and A. Rouessac Analyse chimique, Editions Dunod 2004
- [15] Pascal STROBEL Conception et realisation d'un système multicapteurs portable intelligent en vue de la detection des gaz polluants no2, h2s et so2 en melange de faible concentration. Thèse de doctorat Université Met 2006
- [16] T.Seiyama, N.Yamazoe, S.Yamauchi. "Chemical Sensor Technology" Vol 1, 2, 3 et 4. Elsevier Science Ltd, 1988.